V. Frequenzspektrum. Zweidimensionale Zerlegungstheorie.

Bearbeitet von Professor Dr. F. Schröter, Ulm a/D.

1 a. Das Frequenzspektrum des Fernsehsignals. Die Gleichstromkomponente.

Wir haben beim Entwickeln der eindimensionalen Zerlegungstheorie als *entscheidende* Größe nur die Höchstfrequenz $f_{\max}$ bzw. die Bandbreite $\Delta f_{\max}$ angesehen, die für die Bild*schärfe* maßgebend ist. Dabei wurde unterstellt, daß $\Delta f_{\max}$ als untere Grenze den Wert Null hat. Ehe wir zur zweidimensionalen Theorie übergehen, ist es erforderlich, das Spektrum des beim Abtasten der Bildvorlage entstehenden Signals in seiner Gesamtheit zu betrachten. Die Bedeutung des Schrittes von der ein- zur zweidimensionalen Behandlung des Zerlegungsvorganges wird dadurch besser verständlich.

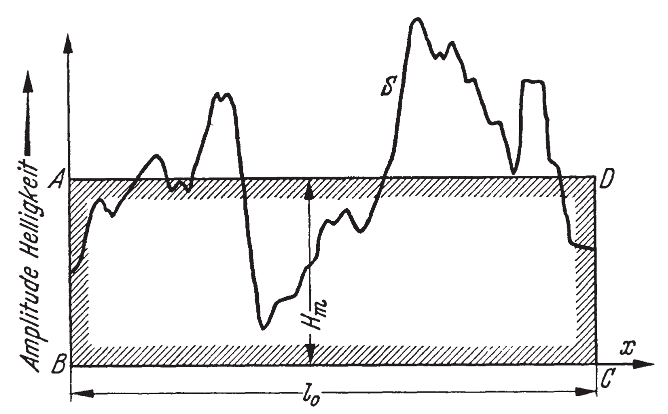


Abb. 186. Der Helligkeits-Mittelwert H_m oder die Gleichstromkomponente des Fernsehspektrums ist gleich der Fläche des mit dem Kurveninhalt des Signals S flächengleichen Rechtecks ($ABCD$), dividiert durch die Einheitslänge l_0, die die Integrationsgrenzen bestimmt.

Das Frequenzspektrum des Fernsehsignals beginnt nun in der Tat mit $f = 0$. Dies ist leicht einzusehen, wenn man bedenkt, daß die mittlere Helligkeit H_m sich in einem belebten Bilde bisweilen nur äußerst langsam ändert und daß sie andererseits für die natürliche Wiedergabe des optischen Geschehens unentbehrlich ist. Es kommt z. B. vor, daß im Bildrahmen eine Person sich vor einem lange Zeit hindurch gleichbleibenden Hintergrund ohne merkliche Belichtungsänderungen aufhält oder bewegt. Man denke an Interviews vor der Fernsehkamera. H_m erfährt dann oft sekunden-, ja minutenlang keine Änderung. Dies führt zu Frequenzen ihres Wechsels von der Größenordnung $^1/_{10}$ oder $^1/_{100}$ Hz. Praktisch liegt daher der untere Grenzwert von $\Delta f_{\max}$ bei Null, und wir müssen Sorge tragen, daß auch die allerlangsamsten Schwankungen des Helligkeitspegels, dem die räumliche Variation von H als Bilddetail überlagert ist, im Empfänger wiedergegeben werden.

Wir bezeichnen H_m als die Gleichstromkomponente des Fernsehsignals, d. h. als die während der Betrachtungsdauer unveränderliche Größe, die infolgedessen durch einen Strom konstanter Stärke übertragen wird. Sie ist das Integral über alle innerhalb dieser Zahl vorkommenden Helligkeitswechsel. Abb. 186 zeigt, daß H_m entsteht, wenn man $H = f(x)$, die Helligkeitsverteilung längs der Abtastbahn, als Ordinate über der Einheitsstrecke l_0 aufträgt und das flächengleiche Rechteck mit l_0 als Basis konstruiert. Seine Höhe gibt dann H_m an. Sonach

gilt, räumlich und zeitlich ausgedrückt:

$$H_m = \frac{1}{l_0} \cdot \int_0^{l_0} H(x)\, dx = \frac{v}{l_0} \cdot \int_0^{l_0/v} H(t)\, dt, \qquad \text{(V.1)}$$

wo v die Geschwindigkeit des Abtastquerschnitts bedeutet. Vorausgesetzt ist hierbei, daß l_0 sich über einen genügend großen Teil des Bildfeldes — mindestens eine Zeile — erstreckt.

Es ist unerläßlich, daß H_m mit seinem richtigen Wert übertragen wird. Geschähe dies nicht und überließe man die Regelung des Mittelwertes der Auf-

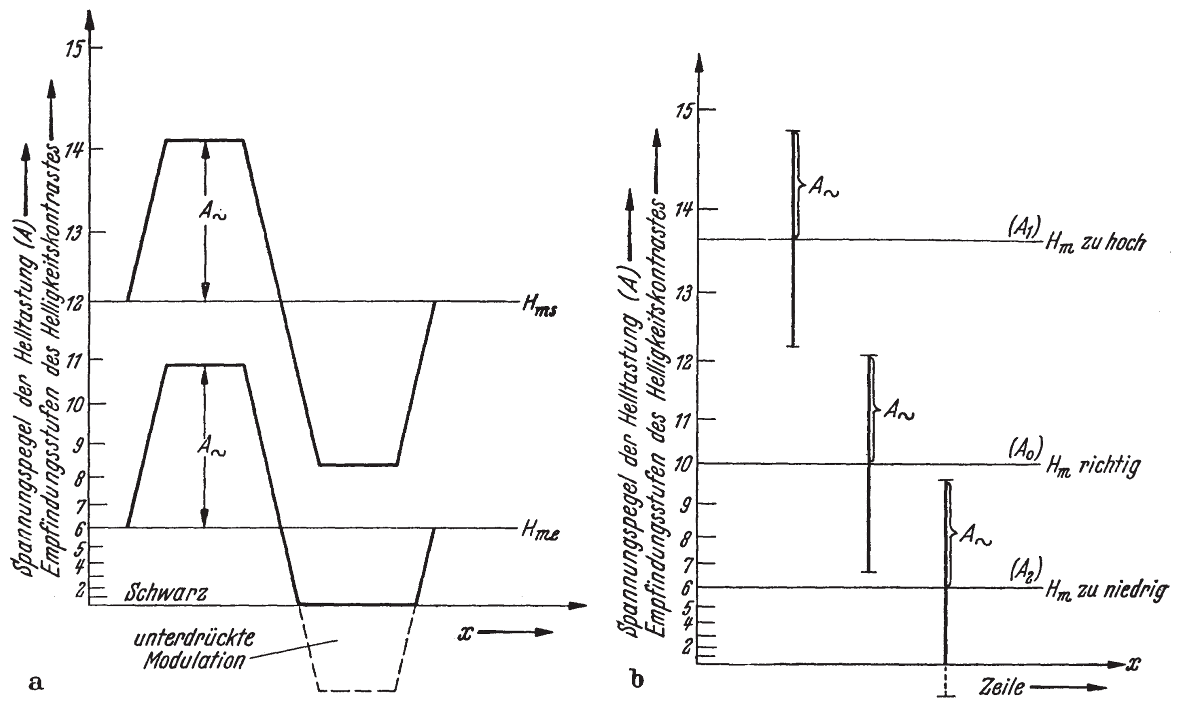


Abb. 187 a. Zur Veranschaulichung der Wirkung falscher Einstellung des Helligkeits-Mittelwertes (H_{me}) im Empfangsbild. H_{ms} ist der gegebene Mittelwert im Originalbild. Eine H_{me} überschreitende Wechselamplitude $A_\sim$ führt bei der Wiedergabe zur Unterdrückung von Bildeinzelheiten durch Nivellierung der dunklen Grautöne zu gleichmäßigem Schwarz und verfälscht die Kontrastskala.

Abb. 187 b. Zu hohe Einstellung von H_m im Empfangsbild verengert die Kontrastskala, die bei Modulation mit der Wechselamplitude $A_\sim$ durchlaufen wird; bei zu tiefer Regelung von H_m gehen dunkle Graustufen verloren.

hellung des Empfangsschirmes dem Ermessen des den Apparat Bedienenden, so wären zwei Fehler möglich:

1. Bedeutet H_{ms} die mittlere Helligkeit beim Sender, H_{me} die beim Empfänger, so müßte nach Abb. 187a das Auftreten einer Wechselamplitude $A_\sim$ im Falle

$$H_{ms} > A_\sim > H_{me}$$

zur Abschneidung der dunkelsten Halbtöne, also zur Unterdrückung von Bilddetail, führen. Im RC-Verstärker wäre ein Einschwingvorgang und eine plötzliche Verlagerung von H_{me} die Folge.

2. Nach den in Kap. II. 5a bis 5c entwickelten physiologischen Gesetzen ist es für die Erhaltung der Kontrastskala wichtig, daß das Intervall der im Sendebild vorhandenen Helligkeitswerte verhältnisrichtig wiedergegeben wird. Es tritt sonst nach Abb. 187b eine Fälschung der Gradation ein. Wir sehen hier die beiden Fälle veranschaulicht, daß H_m das eine Mal zu hoch und das andere Mal zu niedrig eingestellt worden ist. Bei zu hohem H_m wird die Modulation in den Lichtern des Bildes stark eingeebnet. Die Wirkung ist analog der von

Nebenlicht auf dem Schirm. Da zur Empfindung einer Unterschiedsstufe bei großen Helligkeiten ein höheres ΔH gehört, als bei kleinen, so wird die Kontrastskala an ihrem oberen Ende zusammengedrückt. Bei zu niedrigem H_m ergibt sich, abgesehen von der Möglichkeit des unter 1. erwähnten Ausfalls von Einzelheiten in den Schatten, womit infolge der nichtlinearen Steuerkennlinie der BRAUNschen Bildschreibröhre schon vor Erreichen von $H = 0$ eine Nivellierung der dunkelsten Graustufen zu gleichmäßigem Schwarz einhergeht, eine unzulängliche Gesamtaufhellung, die zugleich den Detailkontrast vermindert.

Wird wie in Abb. 188 eine Trägerfrequenz zur Verstärkung des Fernsehsignals benutzt, so ist es ohne weiteres möglich, das Frequenzspektrum bis herunter zu $f = 0$ zu übertragen. Die Helligkeitsmodulation ist die Einhüllende dieser Trägerfrequenz, und wir können analog dem Falle von Abb. 186 ohne weiteres die von der Einhüllenden mit der Strecke l_0 gebildete Fläche durch das dieser letzteren inhaltsgleiche Rechteck ersetzen, dessen Höhe H_m entspricht. Modulieren wir also mit dem Abtaststrom einen Hilfsträger, den wir anschließend, nach der nötigen Verstärkung, direkt auf die Ausstrahlfrequenz transponieren oder aber zuvor gleichrichten, um mit dem wiedergewonnenen Bildsignal unmittelbar die Modulationsstufe des Senders zu steuern, so werden in beiden Fällen die Helligkeitswerte (vom Schwarzwert aus) mit dem richtigen mittleren Niveau $= H_m$ getastet. Es ist aber statt dessen üblich, und zum Teil unumgänglich, das von der Bildgeberröhre gelieferte Signal in einem RC-Verstärker auf den zur Modulation erforderlichen Pegel zu bringen und die Gleichstromkomponente erst im Modulatorteil des Senders hinzuzufügen („DC-restoration"). Da der RC-Verstärker naturgemäß nur Wechselströme durchläßt, reagiert er auf die Schaltstöße der Bildabtastung mit Einschwingvorgängen. Solche Schaltstöße treten nun auch auf, wenn die Gleichstromkomponente von einem Wert auf einen anderen springt. Die S. 283 erwähnten, ganz langsamen periodischen Änderungen von H_m (die ja auch im einmaligen Schaltvorgang enthalten sind, vgl. das FOURIER-Integral der Sprungfunktion, S. 152) würden vom RC-Breitbandverstärker mit untragbar großer Phasenverzerrung übertragen werden. Man vermeidet diese Schwierigkeit durch den Kunstgriff der „Schwarzsteuerung". Sie gestattet, die am Verstärkereingang unterdrückte Gleichstromkomponente unter Ausnutzung des im Impulsgemisch der „Einkanalsendung"[1] vorkommenden konstanten Anschlagwertes am Ausgang wieder einzuführen. Das Verfahren beruht auf der Tatsache, daß sich beim Zeilenimpuls mit einer Verschiebung des Mittelwertes der Bildhelligkeit die Sprunghöhe des Sendestromes im gleichen Verhältnis ändert. Denn der Zeilenimpuls ist ja die Tastung auf den Anschlag Null oder Maximum, je nachdem, ob die sogenannte „positive" oder „negative" Modulation benutzt wird. Somit liefert, auch wenn H_m vom Verstärker nicht direkt übertragen wird, der periodische Zeilenimpuls durch die definierte Sprunghöhe ein

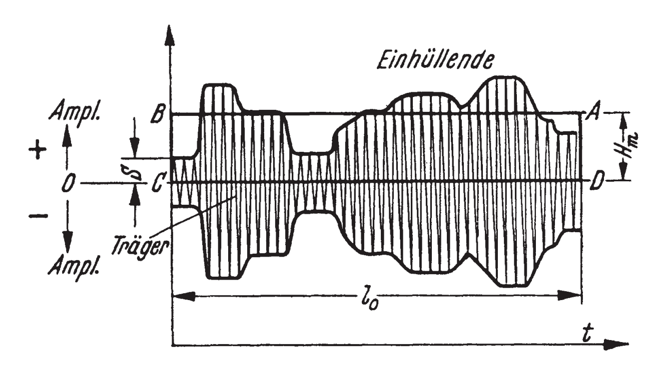


Abb. 188. Bei trägerfrequenter Übermittlung des Bildsignals (Einhüllende) wird die Gleichstromkomponente des Fernsehspektrums (H_m) direkt mitübertragen. Sie ist definiert durch das mit der Signalkurve flächengleiche Rechteck $ABCD$, dividiert durch die Integrationslänge l_0. Werden die Bildströme einem konstanten Schwarzpegel S überlagert, so ist dessen Betrag von H_m abzuziehen, um den wahren Helligkeits-Mittelwert des Bildes zu erhalten.

[1] Helligkeitsimpulse + Synchronisierzeichen, vom festliegenden Schwarzwert aus in entgegengesetzter Richtung getastet.

Maß der Gleichstromkomponente, und zwar gewissermaßen als deren Träger, der von ihr in seiner Amplitude moduliert ist. Die auf diesen Umstand gegründete, in verschiedener Weise durchführbare Schwarzsteuerung [*1*] wird, ebenso wie der RC-Bildverstärker, im Teilband 2 behandelt.

1b. Die Wechselstromanteile des Fernsehsignals.

In jedem Fernsehbilde überlagert sich der Gleichstromkomponente H_m eine örtlich veränderliche Helligkeit, deren Abtastung eine Summe von Frequenzen liefert. Die Amplituden und Phasen dieser Schwingungen wechseln räumlich und zeitlich. Beziehen wir H_m auf die einzelne Zeile, deren Frequenz f_z ist, so können wir die Helligkeitsverteilung für ein unbewegtes Bildfeld vollständig auf f_z als Grundfrequenz zurückführen, stets vorausgesetzt, daß der Vertikalgradient von H innerhalb der Zeilenbreite unmerklich bleibt. Bei Bildtelegraphie tritt bekanntlich die Umlaufperiode der Bildtrommel im übertragenen Signal markant hervor, weil der Befestigungssteg des Dokuments als Unterbrecher des Abtastlichtstromes wirkt. Ihr entspricht beim Fernsehen die Zeilenfrequenz f_z, indem am Ende jeder Zeile der Kathodenstrahl zum Zwecke unsichtbaren Rücklaufs ausgetastet wird. Die in Zeilenrichtung erfaßte Folge von Intensitätswechseln stellt demnach eine Reihe von Harmonischen von f_z dar, und das Signal als Ganzes hat die Form der FOURIER-Reihe:

$$H_t = H_m \cdot \left[1 + \sum_{p=1}^{p=\infty} M_p \cdot \sin\left(2p\pi f_z t + \varphi_p\right)\right], \qquad \text{(V.2)}$$

wo $p = 1, 2, 3 \ldots$ die Ordnungszahl der Harmonischen, M_p den Modulationsgrad von H_m und φ_p den Phasenwinkel bedeutet. Bei bewegten Bildern ändern sich die M_p und φ_p mit der Zeit mehr oder weniger rasch.

Gehen wir nun von der einzelnen Zeile zur gesamten Bildfläche über, so ist von vornherein klar, daß H_m sich mit Zeilenfrequenz ändern kann. Ferner tritt infolge der periodischen Wiederholung des Einzelbildes die Bildwechselfrequenz f_b (bzw. bei Zeilensprung die Feldfrequenz f_f) auf. Wir sind daher berechtigt, die Modulation von H_m als eine Reihe von Harmonischen der Frequenz f_b zu betrachten ($f_z = k \cdot f_b$). Das vollständige Fernsehspektrum entsteht demgemäß, indem man in Gl. (V.2) den Multiplikator H_m seinerseits als Summe eines konstanten Mittelwertes plus der diesem überlagerten Harmonischen von f_b hinschreibt. Die Multiplikation führt dann in dem Summenglied von Gl. (V.2) zum Produkt zweier Sinus mit den Grundfrequenzen f_b und f_z, also zu einer Modulation der Zeilenfrequenz bzw. ihrer Harmonischen $p \cdot f_z$ mit f_b (an dessen Stelle bei Zeilensprung f_f tritt). Daneben sind f_b (bzw. f_f) als solche im Spektrum vorhanden.

Daß bei dieser Zerlegung die Ordnungszahl p hohe Werte annehmen kann, die in der Wiedergabe *Mehrdeutigkeiten* hervorrufen (s. S. 293), ist leicht zu verstehen: Am Orte eines *vertikalen* Helligkeitssprunges, d. h. einer horizontal gerichteten Hell-Dunkel-Kante, erfaßt der Abtastvorgang die Intensitätsänderung innerhalb der Dauer einer Zeile. Das erzeugte Signal erhält infolgedessen die Grundfrequenz $f_z/2$. Deren Harmonische niederer Ordnung fallen, wie man sieht, bereits mit solchen von f_z zusammen, die eine *längs* der Zeile gegebene Abschattierung, also eine *horizontale* Helligkeitsänderung von passender räumlicher Periode, auslösen könnte. Es ist das Verdienst von P. MERTZ und G. GRAY [*2*], diese Verhältnisse näher analysiert und in mathematisch eleganter Form dargestellt zu haben.

In dem voraufgehenden Kap. IV hatten wir uns nur mit dem Begriff der Grenzfrequenz f_{gr} (bzw. $w_{gr} = 2\pi f_{gr}$) befaßt, von der die Steilheit des Ein-

schwingens bei Hell-Dunkel-Übergängen abhängt. Dieses f_{gr} ist aber nicht eine Frequenz des Abtastspektrums, sondern mit der Durchlässigkeit des Übertragungskanals (Verstärker, Kabel, Filter, Antennen) vorgegeben. Hingegen sind die in den Blendencharakteristiken auftretenden, durch die 1. Nullstelle gekennzeichneten Frequenz*kanten*, als Funktion der Blendeneigenschaften und der Abtastgeschwindigkeit, Komponenten des spektralen Aufbaus, den das Signal nahe seiner oberen Frequenzgrenze aufweist. Ersetzen wir in Gl. (V. 2) die Zeit durch die Zeilenkoordinate, so stellt sich das Bild als eine flächenhafte Helligkeitsverteilung mit harmonischen Periodizitäten dar, die auch ohne Abtastung für sich besteht. Zur Blende gehörige Daten kommen ja in Gl. (V. 2) nicht vor. Die Grenzfrequenz f_{gr} des Kanals ist nur für die Theorie der Übergangs*schärfe* von Bildkonturen maßgebend, beeinflußt aber natürlich nicht das Abtast*spektrum*, das dem Kanaleingang angeboten wird. Dieses Frequenzspektrum ergibt sich allein aus der Helligkeitsverteilung im Sendebild im Zusammenwirken mit der abtastenden Öffnung. Der Amplitudengang der Blendencharakteristik, d. h. das Übertragungsmaß, liefert die Kennlinie der zusätzlichen Dämpfung für die Amplituden der Komponenten nahe der Frequenzkante des Fernsehspektrums, ein Einfluß, der sich der primären, a priori im Bilde vorhandenen Helligkeitsverteilung auf die hohen Harmonischen von f_z überlagert.

In Kap. IV. 7c war davon die Rede, daß die dämpfende Wirkung der Blende durch Entzerrungsschaltungen kompensiert werden kann und dann praktisch nur noch die Grenzfrequenz f_{gr} die Form und den Gesamtverlauf des Einschwingvorganges bestimmt. Man könnte daraus folgern, daß es wenig Interesse bietet. den Einfluß der Blendendaten auf den Hell-Dunkel-Sprung so ausführlich zu behandeln, wie dies im Kap. III geschehen ist. Dagegen läßt sich jedoch einwenden, daß zur richtigen Dimensionierung der Entzerrungsmittel die Dämpfung der Blende als Funktion ihrer Größe, Form und Flußverteilung *genau* bekannt sein muß. Ferner liegt es so, daß bei den Nullstellen des Übertragungsmaßes eine Kompensation naturgemäß unmöglich wird. Es ist daher notwendig, die betroffenen Frequenzbereiche zu ermitteln (vgl. Abb. 54). Schließlich darf man nicht vergessen, daß die Erkenntnis der besonders günstigen Abtast- und Wiedergabeeigenschaften des kreisrunden Kathodenstrahlquerschnitts — vgl. Kap. III. 4d — eine wertvolle Einsicht und eine für die elektronische Fernsehtechnik sehr wesentliche Rechtfertigung bedeutet.

Die Analyse des bei der Abtastung resultierenden Spektrums kann jedoch nur von dem übergeordneten Einfluß der durch das Zeitschema der Bildfeldzerlegung gegebenen *Periodizitäten* ausgehen. Die Blende, bzw. der Abtastquerschnitt beeinflußt in der *Feinstruktur* an der Kante des Frequenzbandes lediglich den Amplitudengang der höchsten Harmonischen von f_z. Das allgemeine Bildungsgesetz des Schwingungsspektrums ist aber durch jene Periodizitäten bedingt.

Von dieser Tatsache macht auch die zweidimensionale Theorie der Bildfeldzerlegung Gebrauch, um zu einem allgemeingültigen analytischen Ausdruck für das Frequenzspektrum der Abtastung zu gelangen. Die erste Veröffentlichung hierüber, von P. MERTZ und F. GRAY [2], geht bis 1934 zurück. Diese Arbeit bedeutete einen großen Fortschritt in der mathematischen Formulierung der das Zerlegungsergebnis bestimmenden Bildstruktur sowie in der Beschreibung der Wirkung des Abtastquerschnitts (den wir im folgenden wieder als „Blende" bezeichnen wollen). Die Zeilen werden nicht mehr als unabhängig voneinander bestehend angesehen. Es wird vielmehr als gleichberechtigt mit der horizontalen Helligkeitsverteilung die senkrecht dazu vorhandene berücksichtigt; die auch in dieser Richtung endliche Ausdehnung der Blende führt beim Abtastvorgang zur

Miterfassung des Vertikalverlaufs der Leuchtdichte, und es muß daher im Abtastfrequenzspektrum eine diesem Vorgang entsprechende Komponente erscheinen. Diese letztere kann aber von den aus der horizontalen Auflösung längs der Zeilen herrührenden Anteilen des Spektrums nicht unabhängig sein, da durch die Einheitlichkeit der Bewegung, die die Blende im Bildfeld ausführt, beide Zerlegungen funktionell miteinander verknüpft sind.

Man gelangt jedoch, wie MERTZ und GRAY gezeigt haben, bei der Ableitung der spektralen Struktur des Abtastspektrums, soweit sie lediglich die *Lage* der einzelnen Frequenzen, nicht deren individuelle *Dämpfung* betrifft, mit der vereinfachenden Annahme einer punktförmigen Blende zur vollständigen Beschreibung dieses Frequenzschemas. Wir werden MERTZ und GRAY auf diesem Wege im nächsten Abschnitt folgen.

1c. Ableitung des Frequenzspektrums aus der Bildstruktur.

Vorausgesetzt ist eine ideale Übertragung ohne Zeitkonstanten und Frequenzgrenzen, ferner zunächst ein unbewegter Bildinhalt. Die Ausdehnung der Abtastblende bleibt fürs Erste unberücksichtigt; sie soll im folgenden als verschwindend

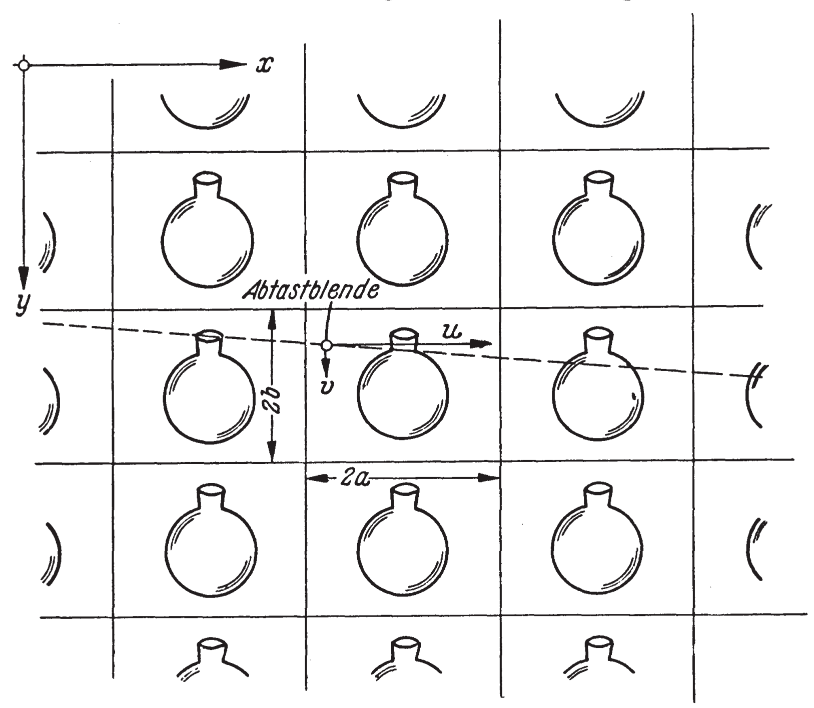


Abb. 189. Hilfsvorstellung für die Theorie der Bildabtastung nach P. MERTZ und F. GRAY, V. [2]. Das Bildfeld wird in beiden Koordinatenrichtungen beliebig oft wiederholt gedacht, um die Abtastung längs einer ununterbrochenen geraden Bahn durchzuführen; u horizontale, v vertikale Geschwindigkeitskomponente.

klein angenommen werden. Um die in den abgeleiteten Ausdrücken auftretenden Ordnungszahlen traditionsgemäß zu schreiben, seien im Übereinstimmung mit MERTZ und GRAY hier, von dem sonstigen Gebrauch in diesem Buche absehend, die gewohnten Buchstaben m und n benutzt. Es bedeutet also n hinfort nicht die Zahl der Bilder je Sekunde, sondern die zu einer Bildkomponente gehörende *Ordnungszahl.* Ferner tritt an die Stelle der Bildbreite = Zeilenlänge l die Bezeichnung $2a$ und an die Stelle der Bildhöhe q die Bezeichnung $2b$.

Der Gang der Analyse wird auf die Telegraphie einer starren Bildvorlage zurückgeführt; in dieser Form sind auch die Folgerungen der Theorie experimentell bestätigt worden. *Vom Zeilensprungverfahren wird vorläufig abgesehen.* Den zur Fernseh-Abtastung überleitenden Kunstgriff zeigt Abb. 189. Man denkt sich

das abzutastende Bildfeld in der Zerlegungsebene nach beiden Koordinatenrichtungen x, y beliebig oft wiederholt, wie es die Figur angibt. Die Abtastblende läuft darüber in der gestrichelten Bahn hinweg und erfaßt dabei den Bildinhalt gleichzeitig nach der Horizontalen und der Vertikalen. Auf die dargestellte Weise geht die Zerlegung stoßfrei und völlig kontinuierlich vor sich, weil in beiderlei Fortbewegungssinn unbegrenzt viele Wiederholungen gedacht werden können und die Einzelbilder von der Größe $2a \cdot 2b$ sich lückenlos aneinanderschließen[1].

Wir denken uns die Achsen des Koordinatensystems in den Mittelpunkt des Bildfeldes gelegt und parallel zu x und y gerichtet. Dann hat nach FOURIER die Helligkeit H längs einer Zeile von $-a$ bis $+a$ die Form:

$$H_{(x, y_1)} = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} A_m \cdot e^{j\pi \frac{m x}{a}}, \tag{V.3}$$

wo y_1 die vertikale Koordinate der betrachteten Zeile bedeutet und m die Ordnungszahl der FOURIER-Komponenten. Infolge der gewählten Lage des Koordinaten-Mittelpunktes sind die komplexen Amplituden A_m gegeben durch:

$$A_m = \frac{1}{2} a_m \cdot e^{j\varphi_m}; \qquad A_{-m} = \frac{1}{2} a_m \cdot e^{-j\varphi_m}; \tag{V.4}$$

hier stellen die a_m die Amplitude der m-ten FOURIER-Komponente und die φ_m deren Phasenwinkel dar. Im ruhenden Bilde bleiben die A_m zeitlich konstant. Sie variieren aber räumlich mit y infolge der vertikalen Helligkeitsverteilung, die wiederum durch eine FOURIER-Reihe ausgedrückt werden kann. Man schreibt sie daher wie folgt:

$$A_m = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} A_{m,n} \cdot e^{j\pi \frac{n y}{b}}. \tag{V.5}$$

Durch Substitution von Gl. (V.5) in Gl. (V.3) ergibt sich:

$$H_{(x,y)} = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} A_{m,n} \cdot e^{j\pi\left(\frac{m x}{a} + \frac{n y}{b}\right)}. \tag{V.6}$$

Die komplexen Amplituden haben dann die Form:

$$A_{m,n} = \frac{1}{2} a_{m,n} \cdot e^{j\varphi_{m,n}} \quad (a_{m,n} \text{ reell}), \tag{V.7}$$

und sind zu berechnen nach:

$$A_{m,n} = \frac{1}{4ab} \cdot \int_{-a}^{+a} \int_{-b}^{+b} H(x, y) \cdot e^{-j\pi\left(\frac{m x}{a} + \frac{n y}{b}\right)} \cdot dx\, dy. \tag{V.8}$$

Wir haben damit bereits die optische Zerlegung des gesamten Bildfeldes $2a \cdot 2b$ gewonnen. Jedes einzelne Glied der doppelten Summe in Gl. (V.6) ist der mathematische Ausdruck einer durch m und n in bestimmter Richtung orientierten, die Bildfläche regelmäßig bedeckenden, sinusförmigen Welligkeit der Leuchtdichte. MERTZ und GRAY stellten sich also das Bild als Superposition von Helligkeitswellen der Periodenzahlen 0 bis ∞ vor, die in unendlich vielen verschiedenen

[1] Wir folgen einer von H. KÖLLNER [3] in der Telefunkenztg. Nr. 78 (1938) gegebenen Darstellung der Arbeit vom MERTZ und GRAY, um im Hinblick auf anschließende Erweiterungen, die das Zeilensprungverfahren und die Bewegungen im Bilde betreffen und die im wesentlichen von KÖLLNER herrühren, die Kontinuität der Betrachtungsweise zu wahren.

Winkeln relativ zum Koordinatensystem einander überlagert sind. Abb. 190 zeigt eine Zusammenstellung von Wertepaaren m, n niederer Ordnung, wobei m von 0 bis 4, n von -4 bis $+4$ läuft. In Wirklichkeit gehen diese sogenannten „Bildfeldkomponenten" (m, n) bis zu sehr hohen, praktisch mindestens bis zu den durch die Zeilenzahl k gegebenen Werten. In Abb. 190 sind die Wellen der Deutlichkeit halber als reine Rechteckwellen von Schwarz und Weiß gezeichnet, während sie in der FOURIER-Zerlegung als sinusförmige Helligkeitsverläufe zu denken sind. Man sieht an der Figur, daß jedem bestimmten Wertepaar m, n eine im Bildfeld eindeutig definierte Richtung zugehört; dies eben führt zum Begriff einer „Komponente" von individueller und unabhängiger Existenz. Ein plastisches Modell jeder solchen Komponente wäre ein Wellblech, dessen Wellenhöhe hier der Leuchtdichte entspräche[1].

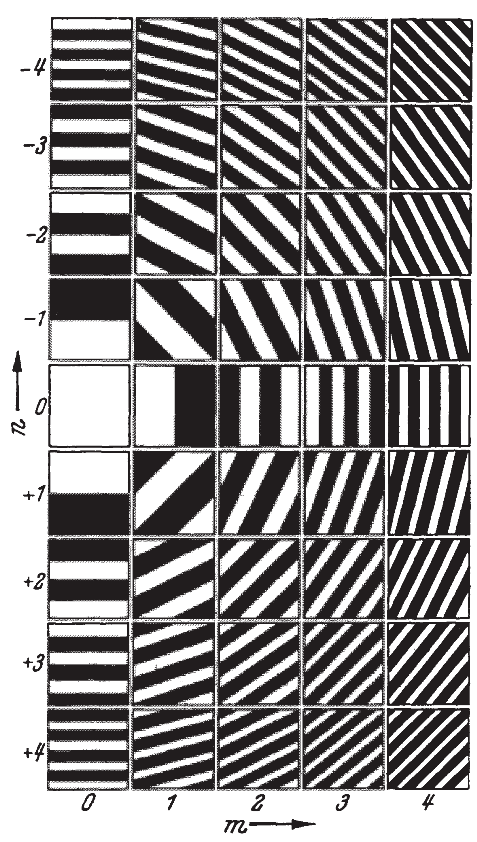


Abb. 190. Feld von Bildkomponenten niederer Ordnung, m, n, nach P. MERTZ und F. GRAY, V. [2], in vereinfachter Darstellung, ohne sinusförmige Helligkeitsvariation.

[1] An Abb. 190 fällt auf, daß n von —-Werten zu +-Werten, m aber einseitig nur von 0 zu +-Werten läuft. Denkt man sich das ganze Bildfeld als abgewickelte Schraubenlinie, wie es der Trommelabtastung des Bildtelegraphen entspricht, so kann man diese Abwicklung, deren Richtungs-Koordinate x sei, von der Bildfeldmitte aus betrachten, so daß x von $-L$ (Anfangspunkt der Schraubenlinie) über Null (im Mittelpunkt) bis $+L$ (Endpunkt der Schraubenlinie) reicht. Längs der ganzen endlichen Strecke $2L$ ist dann die Helligkeit $H(x)$, unter Einschluß der Gleichstromkomponente, aus der Grundfrequenz der Wellenlänge $2L$ mit der Ordnungszahl $m = 1$ und ihren sämtlichen Harmonischen mit $m = 2, 3, 4 \ldots$ zusammengesetzt. Folglich kann $H(x)$ durch eine einfache FOURIER-*Reihe* ausgedrückt werden, die nach MERTZ und GRAY lautet:

$$H(x) = \sum_{m=0}^{m=\infty} a_m \cdot \cos\left(\frac{m\pi x}{L} + \varphi_m\right);$$

a_m bedeutet die Amplitude der m-ten Oberwelle und φ_m deren Phasenwinkel. Hierbei ist es gleichgültig, an welchen Punkten der Abwicklungsstrecke die Nulldurchgänge der Grundharmonischen und ihrer Multipla liegen, da über die φ_m keine verknüpfende Vorschrift besteht. Will man nun eine zur Bildmitte symmetrische Darstellung einführen, so braucht man nur auf die Exponentialreihe überzugehen, indem mittels des Satzes:

$$\cos x = \frac{1}{2}\left(e^{+jx} + e^{-jx}\right)$$

die Zerlegung vorgenommen wird:

$$2a\cos\left(\frac{\pi x}{L} + \varphi\right) = a\,e^{j\varphi} \cdot e^{j\frac{\pi x}{L}} + a\,e^{-j\varphi} \cdot e^{-j\frac{\pi x}{L}}.$$

So ergibt sich:

$$H(x) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} A_m \cdot e^{\frac{j\pi m x}{L}},$$

mit den konjugiert komplexen Amplituden $A_m = \frac{a_m}{2} e^{j\varphi_m}$ und $A_{-m} = \frac{a_m}{2} e^{-j\varphi_m}$ [vgl. Gl. (V.4)]. Die Ordnungszahl m läuft jetzt in der Tat von $-\infty$ bis $+\infty$, nicht von 0 bis $+\infty$, wie weiter oben. Beide Schreibformen sind also gleichwertig.

Dem unbefangenen Betrachter der Abb. 190 drängt sich sofort die Tatsache auf, daß — sofern die Blende voraussetzungsgemäß punktförmig bleibt — verschiedene Komponenten das gleiche Abtastsignal liefern. Wählen wir z. B. die 3 Paare:

$$m = 2,\ n = 0;\ m = 2,\ n = +2;\ m = 2,\ n = -2,$$

so zeigt sich bei Annahme waagerechter Blendenbewegung die Möglichkeit des Entstehens der gleichen Frequenz, und zwar sogar mit übereinstimmender Phase und Amplitude, wenn wir die Bahn der Blende jeweils in die richtige Höhe legen und zufällig auch die gleiche Intensität antreffen. Es handelt sich hierbei um den später zu behandelnden Fall der „Mehrdeutigkeit". Die Fortsetzung der mathematischen Theorie von MERTZ und GRAY, soweit sie sich mit der Herleitung des Frequenzspektrums aus der Bildstruktur allein befaßt, bedurfte außer der durch Abb. 190 dargestellten Konzeption keiner weiteren Hypothese, um den augenfälligen Effekt der Mehrdeutigkeit im übertragenen Fernbild vorherzusagen, sofern nur vorausgesetzt werden konnte, daß die bildschreibende Blende ebenfalls von zu vernachlässigender Größe sei. Ein höheres Verdienst jener Theorie bedeutet es, daß die Verfasser das Entstehen der Mehrdeutigkeit auch bei Verwendung endlich weiter Blenden, also unter den Bedingungen der Praxis, beweisen und im Experiment demonstrieren konnten.

Die nach Abb. 189 verlaufende Abtastbewegung, bei der sich das Bildfeld beliebig oft fugenfrei wiederholt, vereinfacht die Behandlung des Problems insofern, als sämtliche sich überkreuzenden Helligkeitswellen kontinuierlich, ohne Phasensprung, fortgesetzt gedacht werden können. Erst dadurch wird auch die Zerlegung nach FOURIER-*Reihen* mathematisch einwandfrei. Wir wollen nun die *zeitliche* Auflösung der durch Gl. (V.6) beschriebenen optischen Vorlage mittels des sie in gerader Bahn überfahrenden Abtastlichtpunktes betrachten. Der lichtelektrische Strom, der hierbei ausgelöst wird, sei mit der Helligkeit proportional; wir drücken dies durch den konstanten Faktor K aus. Bedeutet dann u die horizontale, v die vertikale Geschwindigkeitskomponente des Abtastlichtpunktes, so folgt aus Gl. (V.6) sofort:

$$I(t) = K \cdot \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} A_{m,n} \cdot e^{j 2\pi t\left(\frac{m u}{2a} + \frac{n v}{2b}\right)}. \qquad \text{(V.9)}$$

Hierin gibt die Summe

$$\frac{m\,u}{2\,a} + \frac{n\,v}{2\,b} \qquad \text{(V.10)}$$

die Frequenzen des Signalstromes an. Beschränken wir uns auf die gleichbleibende Abtastgeschwindigkeit der klassischen Helligkeitssteuerung, sind also u und v unveränderliche Größen, so besagt Gl. (V.10), daß die spektrale Zusammensetzung des übertragenen Signals eine regelmäßig aufgebaute Reihe diskreter Frequenzen darstellt. Indem m und n ganzzahlige Werte durchlaufen, trägt jede optische Bildfeldkomponente durch die ihr im Abtaststrom nach Gl. (V.9) und (V.10) zugeordnete FOURIER-Komponente ihren Anteil zum Signal bei. Dieser Anteil ist eine Funktion der Helligkeitsamplitude der betreffenden Welle, während die Lage der Linien im Frequenzspektrum nach Gl. (V.10) durch die Geschwindigkeit der Blende in beiden Richtungen sowie durch die Abmessungen des Bildfeldes ($2a$ bzw. $2b$) bestimmt wird. Nun ist aber $\frac{u}{2a}$ nichts anderes, als die *Zeilenfrequenz*, $\frac{v}{2b}$ dementsprechend die *Bildfrequenz*. Bezeichnen wir erstere, wie bis-

her, mit f_z, letztere jedoch hier mit f_b, so geht der Ausdruck für den spektralen Aufbau des Signals über in:

$$m \cdot f_z + n \cdot f_b \qquad (m, n \text{ Ordnungszahlen}). \qquad \text{(V.10 a)}$$

Es tritt also bei $m = 0$ und $n \neq 0$, d. h. bei in waagerechter Richtung konstanter Helligkeit, vgl. Abb. 190, nur ein Spektrum von Harmonischen der Bildfrequenz auf. Von $m = 1$ ab kommen die Zeilenfrequenz und ihre Harmonischen hinzu.

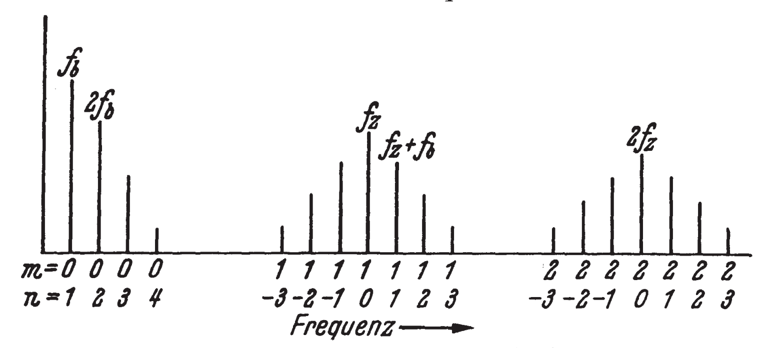


Abb. 191. Frequenzspektrum der Fernsehabtastung; f_z Zeilenfrequenz, f_b Bildfrequenz, m und n Ordnungszahlen. Zwischen den Harmonischen von f_z ist das Spektrum „leer" an Energie.

Solange aber $n \neq 0$ ist, addieren und subtrahieren sich zu bzw. von der Frequenz der durch m gegebenen Harmonischen von f_z diejenigen von f_b. Das Spektrum stellt sich also in seiner Gesamtheit, abgesehen von der Gleichstromkomponente, dar als eine Reihe von gleichabständigen *Hauptlinien*, die Harmonische der Zeilenfrequenz f_z, $2f_z$, $3f_z$ ... sind, mit beiderseits derselben liegenden *Nebenlinien* in den Entfernungen f_b, $2f_b$, $3f_b$ ... Diese letzteren bilden sozusagen *Seitenbänder der Träger* f_z, $2f_z$, $3f_z$ ..., wie bei einem Modulationsvorgang. Ihre Amplitude nimmt mit wachsender Ordnungszahl n zumeist rasch ab, desgleichen die Amplitude der Harmonischen von f_z. Abb. 191 zeigt ein diese Tatsachen wiedergebendes Schema. Auf dessen nachrichtentechnische Bedeutung — Ausnutzung der mitten zwischen den Hauptlinien vorhandenen Energielücken — kommen wir später zurück. Das NTSC-Farbfernsehverfahren beruht auf dieser Möglichkeit.

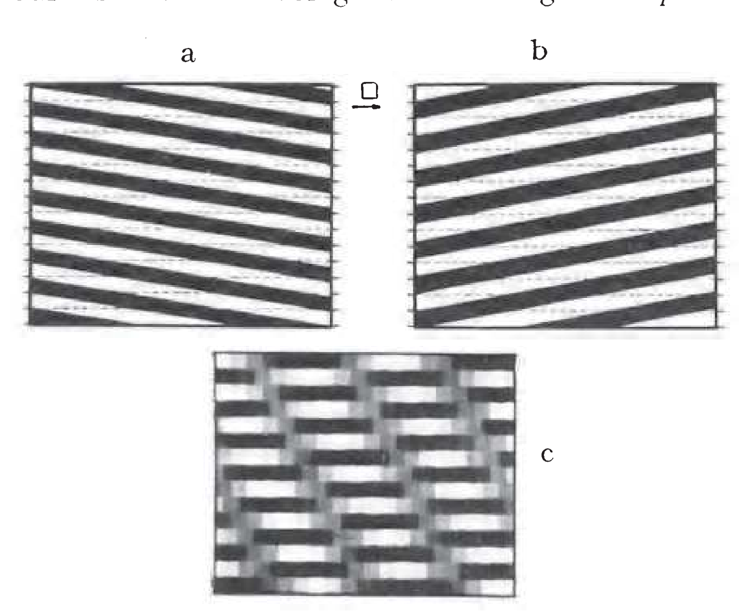


Abb. 192 a–c. Mehrdeutigkeit und Fremdkomponente im Empfangsbild. a und b Vorlagen, die übereinstimmend das Ergebnis c liefern; dieses gestattet nicht, zu entscheiden, ob a oder b übertragen worden ist. Zusätzlich tritt als Fremdkomponente das im Original nicht vorhandene, steil von links oben nach rechts unten verlaufende Störmuster auf. Nach R. URTEL, V. [1].

Wenn auch im allgemeinen nach Abb. 191 der überwiegende Teil des Abtastspektrums ($\Delta f_{\max}$) keine Sendeenergie enthält, so gibt es doch Sonderfälle, in denen ein Bildfeld sehr feine Vertikalstrukturen aufweist, denen große Werte der Ordnungzahl n, also hohe Harmonische von f_b, entsprechen. Dann können sich die aus den Nebenlinien bestehenden Seitenbänder der Zeilenfrequenz-Harmonischen gegenseitig berühren und sogar überlappen; das Spektrum füllt sich auf.

Wird nun das Bild, wie üblich, mit einer ganzen Zeilenzahl k abgetastet, ist also f_b als Teiler in f_z enthalten, nämlich $f_z = k \cdot f_b$, so muß natürlich der Abstand zweier benachbarter Hauptlinien auch ein ganzes Vielfaches von f_b sein. Das bedeutet bei der gedachten Überlappung ein genaues Aufeinanderfallen von Nebenlinien, nämlich solcher, die zum unteren Seitenband der höheren Harmonischen $(p + 1) \cdot f_z$ und solcher, die zum oberen Seitenband der tieferen Harmonischen $p \cdot f_z$ gehören. Damit verschwindet die Unterscheidungsmöglichkeit für die Herkunft derartiger Nebenlinien bei der Wiedergabe des Bildes, mit ihr die bestimmte Zuordnung zu einer definierten Bildfeldkomponente. Das Signal wird *mehrdeutig*. Abb. 192 gibt hierfür ein von R. URTEL [*4*] synthetisch hergestelltes Beispiel, zeigt aber darüber hinaus das Auftreten von sogenannten Fremdkomponenten, auf die S. 303 eingegangen wird. Die beiden oberen Streifenmuster *a* und *b* lieferten beim Abtasten mit einer quadratischen Blende, deren Seitenlänge gleich der Zeilenbreite war, identisch das untere Empfangsbild *c*. Aus diesem läßt sich keineswegs entnehmen, ob die linke oder die rechte Vorlage übertragen wurde. (Infolge der photographischen Reproduktion ist die Abstufung der 7 Grautöne, die das Original aufwies, stark nach Schwarz hin nivelliert.) Klar zu entscheiden ist nur, daß es sich um eine der beiden Vorlagen handeln muß.

Nach dem soeben Gesagten ist bei k Zeilen: $u/2a = k \cdot v/2b$, (V.11)

d. h. es wird Gl. (V.10) mit Gl. (V. 10a) zu:

$$f_z \cdot \left(m + \frac{n}{k}\right). \tag{V.12}$$

Hiernach liefern alle Wertepaare m, n, die in der Klammer die gleiche Summe ergeben, eine und dieselbe Spektralfrequenz, also Mehrdeutigkeit. Diese folgt aus der Identität:

$$\left.\begin{aligned} m + \frac{n}{k} &= m' + \frac{n'}{k} \\ \text{bzw.}\quad n' &= k \cdot (m - m') + n. \end{aligned}\right\} \begin{array}{c} m', n' \text{ zu } m, n \\ \text{mehrdeutiges} \\ \text{Wertepaar.} \end{array} \tag{V.13}$$

Aus Gl. (V.12) geht unmittelbar hervor, daß der Bereich der Verwirrung bei $n = k/2$ beginnt; denn es ist dann:

$$\text{Frequenz beginnender Überlappung} = f_z \cdot \left(m + \frac{1}{2}\right). \tag{V.14}$$

Das heißt eben, daß das obere Seitenband der n-ten Harmonischen und das untere der $(m + 1)$-ten Harmonischen sich bereits berühren. Um aber zu beurteilen, inwieweit das Phänomen visuell stören kann, müssen wir nunmehr den Einfluß der Blendenform, -weite und -transparenzverteilung hinzunehmen, also von der bisherigen Vereinfachung abgehen. Ferner zeigt ja Abb. 191 bereits, daß die Amplituden der höheren Harmonischen von f_z in der Regel monoton (und normalerweise rasch) abfallen. Wir werden also augenfällige Störungen durch Mehrdeutigkeit in der Hauptsache nur zu erwarten haben, wenn der horizontale Wechsel von Hell und Dunkel im Verhältnis zur Zeilenlänge $2a$ erhebliche Ausdehnung hat und daher niedere Harmonische von f_z auftreten, bzw. maßgebend sind. Das ist in typischer Weise der Fall bei Erstreckung des Überganges auf einen nennenswerten Bruchteil von $2a$ infolge von geringer Neigung der Kante zur Waagerechten, wie etwa in Abb. 175.

1d. Einfluß der Blende auf das Abtastsignal in der zweidimensionalen Theorie.

Wir verlegen den Ursprung eines mitbewegten Koordinatensystems, in welchem wir die örtliche Durchlässigkeit der Blende darstellen wollen, in deren Mittelpunkt. Mit der Zerlegung in Zeilenrichtung beginnend, tasten wir diese, als eindimensionale Verteilung (unter Voraussetzung eines fehlenden vertikalen Gradienten), d. h. durch

$$H(x) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} A_m \cdot e^{j\pi \frac{m x}{a}} \; * \tag{V.15}$$

ausgedrückt, in üblicher Weise photoelektrisch ab. MERTZ und GRAY bezeichnen mit $T(\xi)$ die optische Transparenz der Blende an einem Punkte ihrer Öffnung, der mit Bezug auf die Blendenmitte die Abszisse ξ hat. Dieses $T(\xi)$ ist eine Folge der Flußverteilung, aber es kann alternativ auch von der geometrischen Gestalt der Blende am Punkte ξ herrühren, wenn diese so wirkt, daß sie durch ihr Profil einen Lichtstrom konstanter Dichte räumlich begrenzt. Ist x im Bildfeld die Koordinate der Blendenmitte, dann erfährt die Blende am Orte ξ die Beleuchtung:

$$H(x+\xi) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} A_m \cdot e^{i\pi \frac{m\cdot(x+\xi)}{a}} . \tag{V.16}$$

Der gesamte von ihr durchgelassene Lichtstrom, den der Bildpunkt an der Stelle x der betrachteten Zeile liefert, ergibt sich aus der Integration über die horizontale Erstreckung der Blende:

$$\Phi(x) = \int_{\text{Blende}} T(\xi) \cdot H(x+\xi)\, d\xi . \tag{V.17}$$

Nun ist in dem durch Gl. (V.16) dargestellten Produkt zweier e-Funktionen x, als fester Punkt, konstant, und wir können deshalb Gl. (V.17) schreiben:

$$\begin{aligned} \Phi(x) &= \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} A_m \cdot e^{j\pi \frac{m x}{a}} \cdot \int_{\text{Blende}} T(\xi)\, d\xi \cdot e^{j\pi \frac{m\xi}{a}} \\ &= \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} \eta(m)\, A_m \cdot e^{j\pi \frac{m x}{a}} , \end{aligned} \tag{V.18}$$

wo $\eta(m)$ nur von den Eigenschaften der Blende abhängt und mit deren Übertragungsmaß für die m-te Bildfeldkomponente identisch ist. Der gleiche Ausdruck läßt sich für die n-te Komponente aufstellen, wenn wir annehmen, daß die Zerlegung eindimensional in der Vertikalen stattfindet.

Mit Hilfe dieses Ausdruckes haben MERTZ und GRAY die Durchlässigkeit verschiedener Blenden für die einzelnen Bildfeldkomponenten berechnet, wenn $T(\xi)$ nur in der Richtung ξ variiert, während der vertikale Helligkeitsgradient als verschwindend angesehen wird. Es handelt sich also, wohlbemerkt, vorläufig um eine *eindimensionale* Zerlegung; die Blende wird zweckmäßig als eine mathematische Fiktion aufgefaßt, mit nur in Richtung der Zeile endlicher Weite. Längs dieser soll der Verlauf der Durchlässigkeit durch folgende Kurven dargestellt werden: A: Rechteck, B: Halbkreis, C: Cosinus-Halbwelle, D: $\sin x/x$,

* Wir benutzen hier als Ordnungszahl m, weil dieser Buchstabe schon S. 290 mit der gedachten horizontalen, also längs der Zeile erfolgenden Zerlegung verknüpft wurde. Die Gl. (V.15) gilt aber natürlich unabhängig von der Richtung der Zerlegung.

E: $1 + \cos x$, F: Dreieck. In Abb. 193 sind die Ergebnisse für $\eta(0) = 1$ unter Gleichsetzung der Höchstwerte von $T(\xi)$ für alle Blenden eingetragen. Der Abszissenmaßstab ist $|m|\frac{c}{a}$, wobei $\frac{c}{a}$ das Verhältnis Blendenweite : Zeilenlänge bedeutet, wenn die Blendenweite wie oben definiert ist. Der Ansatz ist bei sämtlichen Kurven parabolisch, und wir erkennen für den Fall der Rechteckblende wiederum den 1. Nulldurchgang bei $|m|\frac{c}{a} = 1$, wo die Periode der m-ten Oberwelle der Zeilenfrequenz gerade gleich der Übergangsdauer der Blende über den gewählten Bezugspunkt ist. Für die übrigen Formen wird das Übertragungsmaß

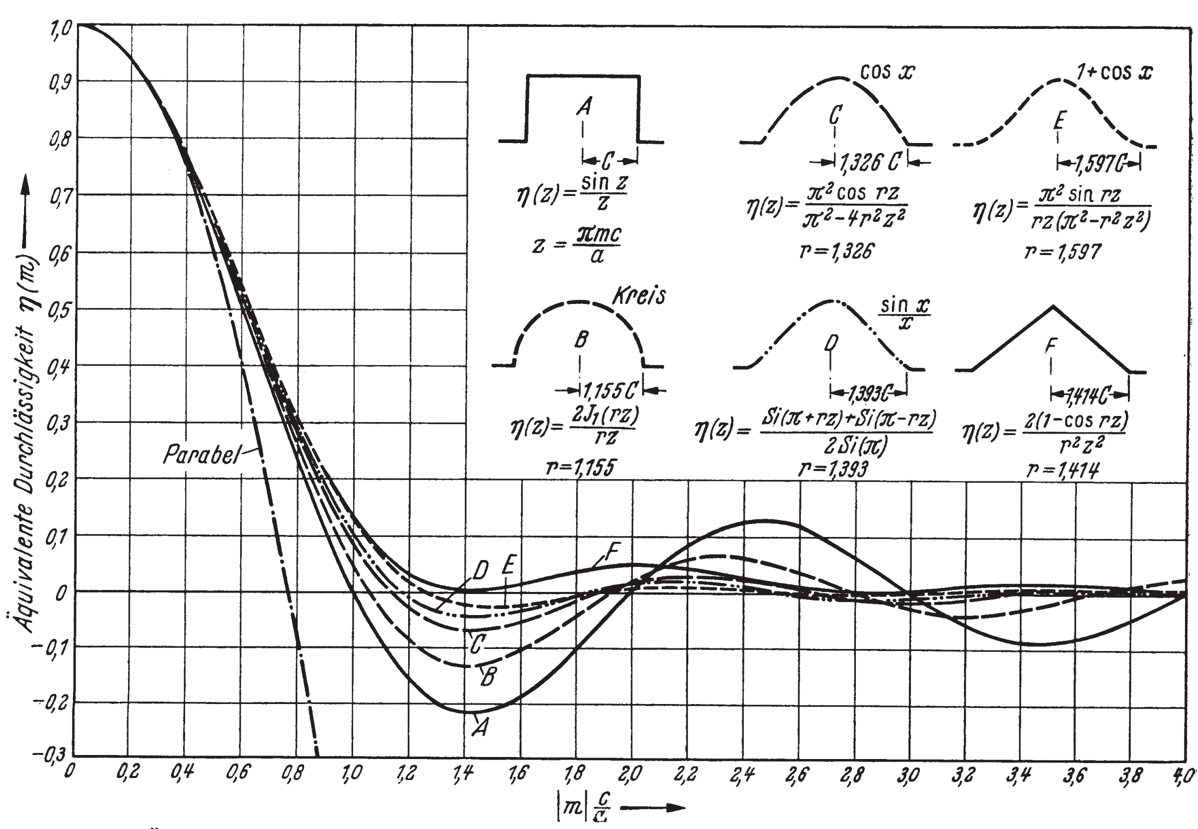


Abb. 193. Äquivalente Blendendurchlässigkeit bei eindimensionaler Abtastung für verschiedene Formen der Abtastöffnung nach P. MERTZ und F. GRAY, V. [2]. Die Ordinatenwerte sind mit einem willkürlichen Faktor multipliziert, um durchweg $\eta(0) = 1$ zu machen. Horizontale Auflösung für sämtliche Öffnungen gleich; d. h. die Blendendurchlässigkeiten stimmen in der Abtastrichtung trotz der Verschiedenheit der Form überein und ergeben daher auch die gleiche Tiefpaßwirkung in bezug auf das durchkommende Frequenzband. Die für gleiche horizontale Auflösung notwendigen Dimensionen sind aus der Zeichnung ersichtlich; die halbe waagerechte Blendenweite ist in Vielfachen (r) von c angegeben.

$\eta(m) = 0$ zwischen $|m|\frac{c}{a} = 1$ und $|m|\frac{c}{a} = 1{,}4$ (Dreieck). Wir erkennen in Abb. 193 die bereits in der eindimensionalen Theorie behandelte Erscheinung des Pendelns zwischen positiven und negativen Werten wieder, durch das mit Ausnahme der e^{-x^2}-Blende die Übertragungsmaße η sämtlicher anderen Abtastöffnungen gekennzeichnet sind. Bei $|m|\frac{c}{a} = 0{,}6$ liegen die $\eta(m)$ durchweg in der Gegend von 0,5; Unterschiede in der Durchlässigkeit sind hier also praktisch kaum vorhanden. Abb. 193 zeigt auch die allgemeine Abnahme von $T(\xi)$ mit wachsender Ordnungszahl, d. h. Feinstruktur.

Der Fall $|m|\frac{c}{a} = 0{,}5$ tritt ein, wenn abwechselnd helle und dunkle Linienelemente der Länge $2c$ längs der Zeile aneinandergereiht sind, also die räumliche Periode dieser Verteilung gleich der doppelten Rechteck-Blendenweite ist. Denken

wir uns die Abtastrichtung in die Vertikale verlegt, so sagt vorstehende Bedingung, daß eine regelmäßige Folge von weißen und schwarzen Zeilen überfahren wird; $\frac{b}{c}$ wäre dann gleich der Zeilenzahl k. Einer solchen Bildstruktur entspricht die Ordnungszahl $n = k/2$. Mit f_b multipliziert, liefert dies eine Abtastfrequenz, die mitten zwischen 2 Hauptlinien des Spektrums fällt, also den Beginn der Verwirrung kennzeichnet. Nach Abb. 193 ist die Durchlässigkeit der verschiedenen Blenden für Strukturen von Zeilenbreite, d. h. bei $|m|\frac{c}{a} = 0{,}5$, etwa 65%. Wir erkennen hierin eine tiefere, auf der vollständigen Analyse des Signalspektrums beruhende Begründung des in Kap. IV. 11d behandelten KELL-*Faktors*. Denn die angegebene Durchlässigkeit besagt nichts anderes, als daß die Durchmodulierung der entsprechenden vertikalen Helligkeitsverteilung und damit die Auflösung in senkrechter Richtung proportional geschwächt wird. Der steile Abfall der Kurven in Abb. 193 oberhalb von $|m|\,\frac{c}{a} = 0{,}5$ zeigt, wie rasch die Sichtbarkeit feinerer Strukturen zurückgeht.

Die vorstehende eindimensionale Ableitung der Blendenwirkung wollen wir nun auf die zweite Koordinate erweitern. Während wir also zunächst die vertikale Ausdehnung der Abtastöffnung vernachlässigt haben, — praktisch würde sich an dem in Abb. 193 dargestellten Ergebnis nichts ändern, wenn die reale Blende ein relativ zur Zeilenbreite schmaler Schlitz wäre — ergänzen wir die Theorie jetzt durch die Annahme, daß die senkrechte Abmessung des Abtastquerschnitts beliebig sei. Nach MERTZ und GRAY ergibt sich dann für die zweidimensionale Blende der gesamte hindurchgehende Lichtstrom:

$$\Phi_s(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \eta_s(m, n)\, A_{m,n} \cdot e^{j\pi\left(\frac{m x}{a} + \frac{n y}{b}\right)} \tag{V.19}$$

mit

$$\eta_s(m, n) = \iint\limits_{\text{Blende}} T_s(\xi, \beta)\, e^{j\pi\left(\frac{m\xi}{a} + \frac{n\beta}{b}\right)}\, d\xi\, d\beta. \tag{V.20}$$

Der Index s bezeichnet die Zuordnung zur Senderseite, β die 2. Koordinate des Blendenpunktes mit der Durchlässigkeit $T(\beta)$. Ist in der Blendenöffnung T_s symmetrisch zu den Achsen der ξ, β verteilt, so gilt:

$$\eta_s(m, n) = \iint\limits_{\text{Blende}} T_s(\xi, \beta) \cos\pi\left(\frac{m\xi}{a} + \frac{n\beta}{b}\right) d\xi\, d\beta. \tag{V.21}$$

MERTZ und GRAY haben auf Grund dieser zweidimensionalen Theorie die Durchlässigkeit $\eta(m, n)$ für eine Reihe verschiedener Blenden berechnet. Ist die Verteilung im Blendenquerschnitt (nach Form und Transparenz) derart, daß die Beziehung gilt:

$$T_s(\xi, \beta) = T_\xi(\xi) \cdot T_\beta(\beta), \tag{V.22}$$

wobei also der 1. Faktor auf der rechten Seite nur von ξ, der 2. nur von β abhängt, dann ergibt sich die Auftrennung:

$$\eta_s(m, n) = \int\limits_{\text{Blende}} T_\xi(\xi) \cdot e^{j\pi\frac{m\xi}{a}} \cdot d\xi \cdot \int\limits_{\text{Blende}} T_\beta(\beta) \cdot e^{j\pi\frac{n\beta}{b}} \cdot d\beta = \eta_\xi(m) \cdot \eta_\beta(n). \tag{V.23}$$

Die beiden eindimensionalen Integrale stellen einen Typus dar, der zur Berechnung der Kurve A für die Rechteckblende in Abb. 193 gedient hat (vgl. auch Abb. 54). Gl. (V.22) ist z. B. bei einer homogen durchfluteten Rechteckblende erfüllt. Diese ist der einfachste Fall, wenn ihre Seiten parallel und senkrecht

zur Zeilenrichtung stehen. Sind die Maße der Blendenkanten $2c$ parallel zur x-Achse und $2d$ parallel zur y-Achse nach Abb. 189, so folgt aus der Annahme:

$$\frac{d}{b} = \frac{c}{a} = \frac{1}{k} \quad (k \text{ Zeilenzahl}) \tag{V.24}$$

die bekannte sin x/x-Beziehung der Rechteckblende:

$$\eta_\xi(m) = \frac{\sin \pi\, m\, c/a}{\pi\, m\, c/a} \quad \text{und} \quad \eta_\beta(n) = \frac{\sin \pi\, n\, d/b}{\pi\, n\, d/b}; \tag{V.25}$$

für m oder $n = 0$ wird der Bruch $= 1$,

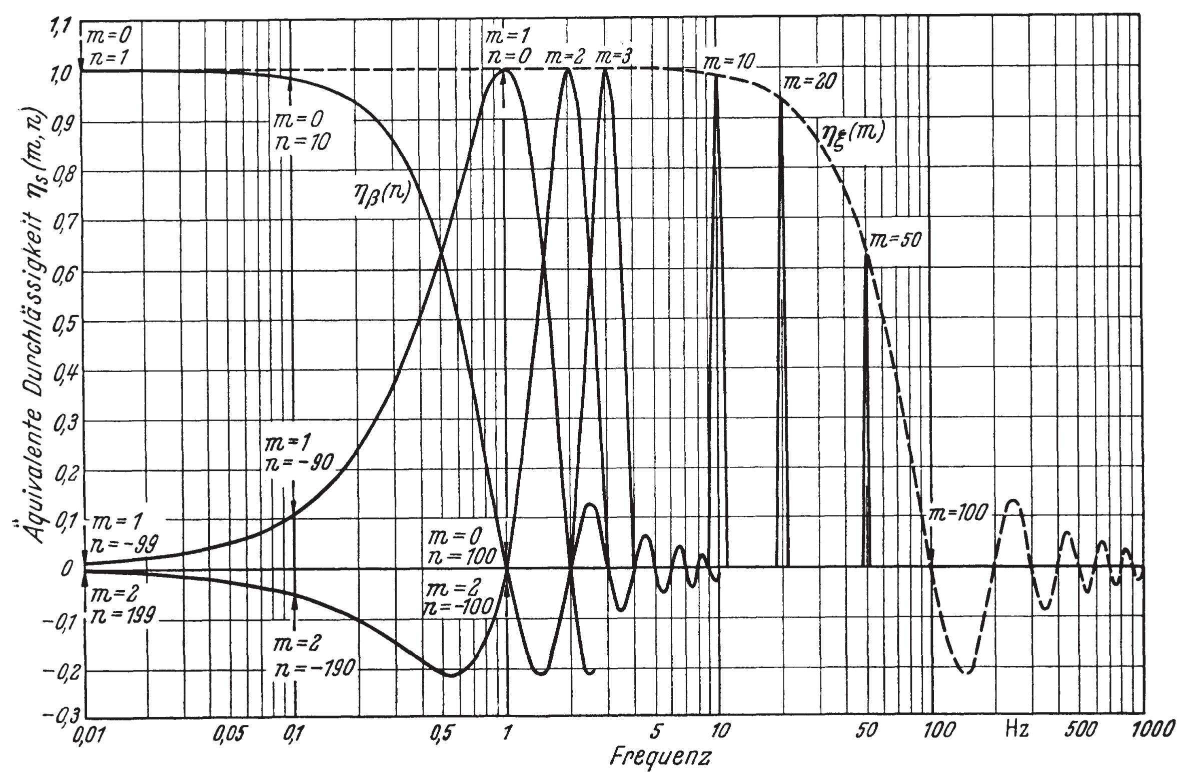


Abb. 194. Äquivalente Durchlässigkeit einer Rechteckblende für zweidimensionale Abtastung, berechnet von P. MERTZ und F. GRAY, V. [2]. Die Abmessungen der Blende sind $2c$ und $2d$, die Transparenz $T_s(\xi, \beta) = T_\xi(\xi) \cdot T_\beta(\beta) = 1$, somit $\eta_s(m, n) = \eta_\xi(m) \cdot \eta_\beta(n)$. Die Zeilenzahl ist $k = 100$, daher wird $\eta_\xi(m)$ erstmalig Null bei $m = 100$. Frequenzmaßstab logarithmisch.

und es wird die Frequenz, die bei der Abtastung einer m, n-Bildfeldkomponente entsteht:

$$f = \frac{u}{2a} \cdot \left(m + \frac{n}{k}\right). \tag{V.26}$$

Dies zeigt wiederum den diskontinuierlichen Aufbau des Frequenzspektrums aus ganzen Vielfachen der Zeilenfrequenz $u/2a$. Jedes bestimmte Wertepaar von m und n ist daran nach Maßgabe von Gl. (V.23) beteiligt. Abb. 194 gibt mit logarithmischer Frequenzskala für $k = 100$ eine Gesamtübersicht. Der Einfachheit halber wurde $u/2a = 1$ gesetzt. Dies entspricht der Komponente $m = 1$, $n = 0$ in Gl. (V. 26); die Signalfrequenz $f = u/2a$ entsteht also exakt, wenn eine Verteilung gemäß dem Schwarz-Weiß-Felde $m = 1$, $n = 0$ in Abb. 190, jedoch mit sinusförmigem Helligkeitsverlauf, von der Blende abgetastet wird, wie zu erwarten war. In Abb. 194 bildet f den Abzissenmaßstab und schreitet wegen $f = u/2a = 1$ um je 1 Hz weiter, wenn m sich um 1 Einheit erhöht ($f = u/2a = f_z$). $T_\xi(\xi)$ und $T_\beta(\beta)$ sind als $= 1$ angenommen (homogen durchflutete Blende. Nur aus Gründen der besseren Verfolgung des Ganges von $\eta_s(m, n)$ sind die Kurven in Abb. 194 kontinuierlich gezogen; in Wirklichkeit hat

man sie sich aus Punkten im Abstand $u/2a\,k$ gebildet zu denken.) Obwohl die logarithmische Darstellung die Gleichabständigkeit der Hauptlinien und die Symmetrie der spektralen Verteilung beiderseits jener nicht augenfällig wiedergeben kann, hat sie den Vorzug, den Verlauf von $\eta_s(m, n)$ über einen breiten Frequenzbereich zu veranschaulichen. Ihre Grundgleichung lautet für die einzelne m, n-Komponente (Rechteckblende!):

$$\eta_s(m, n) = \eta_\xi(m) \frac{\sin \frac{2\pi k c}{u}\left(f - \frac{m u}{2a}\right)}{\frac{2\pi k c}{u}\left(f - \frac{m u}{2a}\right)}, \qquad \text{(V.27)}$$

läßt also das Aussehen einer stark gedämpften Schwingung des Wertes $\eta_s(m, n)$ erwarten. Das Maximum jedes derartigen Kurvenzuges liegt bei $n = 0$, weil dann nach Gl. (V.26) $f = m\,u/2a$ und daher wegen $\lim\limits_{x=0} \sin x/x = 1$ das Übertragungsmaß $\eta_s(m, 0) = \eta_s(m)$ wird. Diese $\eta_s(m)$ entsprechen dem Dämpfungsgang bei eindimensionaler Zerlegung längs der Zeile. Die Nullstellen jedes individuellen $\eta_s(m, n)$ liegen gegen die seinem Maximum zugeordnete Frequenz um die Beträge 1, 2, 3 ... verschoben, folgen also jenem mit ganzen Vielfachen der Zeilenfrequenz. Die in Abb. 194 gezeichnete Kurve $\eta_\beta(n)$ gilt für $m = 0$, wobei $\eta_\xi(m) = 1$ wird [Gl. (V.25)]; die gestrichelte Einhüllende $\eta_\xi(m)$ der individuellen Maxima für $n = 0$, $m = 1, 2, 3, 10$ ... verdeutlicht die zuerst langsam, später schnell zunehmende Dämpfung der Hauptlinien des Fernsehspektrums. Tritt ein endliches n hinzu, so entwickeln sich die Nebenlinien beiderseits jeder Hauptlinie. Man erkennt ferner in Abb. 194, daß in der Mitte zwischen zwei Hauptlinien die Durchlässigkeit der Blende etwa nur 65% beträgt, was im Verein mit der normalen Konvergenz der Koeffizienten in der Fourier-*Reihe* die geringe Signalenergie jener Bereiche erklärt. Des weiteren entnimmt man dieser Darstellung folgendes: Die m und n können sich in ihrem Einfluß auf die Größe $\eta_s(m, n)$ gegenseitig vertreten (wir erinnern uns, daß nach H. O. Schade (Kap. III. [*8*]) das Übertragungsergebnis unabhängig von der Abfragerichtung im Bildfelde ist). Z. B. ist für $m = 0$, $n = 1$ ebenso wie für $m = 1$, $n = 0$ die Durchlässigkeit $\eta_s(m, n) = 1$, andererseits für $m = 0$, $n = 100$ ebenso wie für $m = 100$, $n = 0$ gleichermaßen $\eta_s(m, n) = 0$*. Bei $m = 0$, $n = 100$ liefert die Zerlegung die Zeilenfrequenz $f = 1$, wie es sein muß, weil letztere nach Annahme 100mal so groß ist, wie die Bildfrequenz. Dies geht ebenfalls aus Gl. (V.26) hervor, nach der außerdem $m = 0$, $n = 100$ dasselbe Ergebnis zeitigt wie $m = 2$, $n = -100$, nämlich $\eta_s(m, n) = 0$. Hier tritt wiederum die Mehrdeutigkeit des Signals bei feinen Strukturen in Erscheinung; $n = +100$ und $n = -100$ stellen ja zwei zur Zeilenrichtung entgegengesetzt und gleich schwach geneigte Linienraster dar. Kurzum, Abb. 194 gestattet, das gesamte Frequenz-Amplitudenbild der Zerlegung durch die beschriebene Rechteckblende zu übersehen.

Für andere Blendenformen wird der Verlauf ähnlich, die Berechnung jedoch meist schwieriger. Als Beispiel des zweidimensionalen Effekts der Abtastöffnung sei hier noch der praktisch interessierende Fall der homogen durchfluteten Kreisblende angeführt. Abb. 195. Zur Berechnung diente die allgemeine Gl. (V.20). Jeder einzelnen Hüllkurve entspricht ein angegebener Parameterwert, $|m|\,c/a = 0;\ 0{,}2;\ 0{,}4$ usw. Der bestehenden Symmetrie wegen sind die Kurven nicht nach negativen Werten von n fortgesetzt, sondern es ist der *Betrag* von n ange-

---

* $\eta_s(m, n) = 1$ gilt bei $m = 0$, $n = 1$ mit $k = 100$, weil in Gl. (V. 25) bei kleinen Winkeln der Bogen statt des Sinus gesetzt werden kann.

geben. Der Blendenradius ist c. Dann ist die Durchlässigkeit:

$$\eta_s(m, n) = \frac{2 J_1\left(\pi \sqrt{\left(\frac{m c}{a}\right)^2 + \left(\frac{n c}{b}\right)^2}\right)}{\pi \sqrt{\left(\frac{m c}{a}\right)^2 + \left(\frac{n c}{b}\right)^2}}, \qquad \text{(V.28)}$$

wo J_1 die BESSEL-Funktion 1. Ordnung mit dem Argument des Klammerausdruckes bedeutet. $\eta_s(0,0)$ ist unter Weglassung konstanter Faktoren $= 1$ gemacht. Während bei der Rechteckblende der Parameter $|m|\, c/a = 1$ zur vollständigen Auslöschung der entsprechenden Signalfrequenz führt — ein Ergebnis,

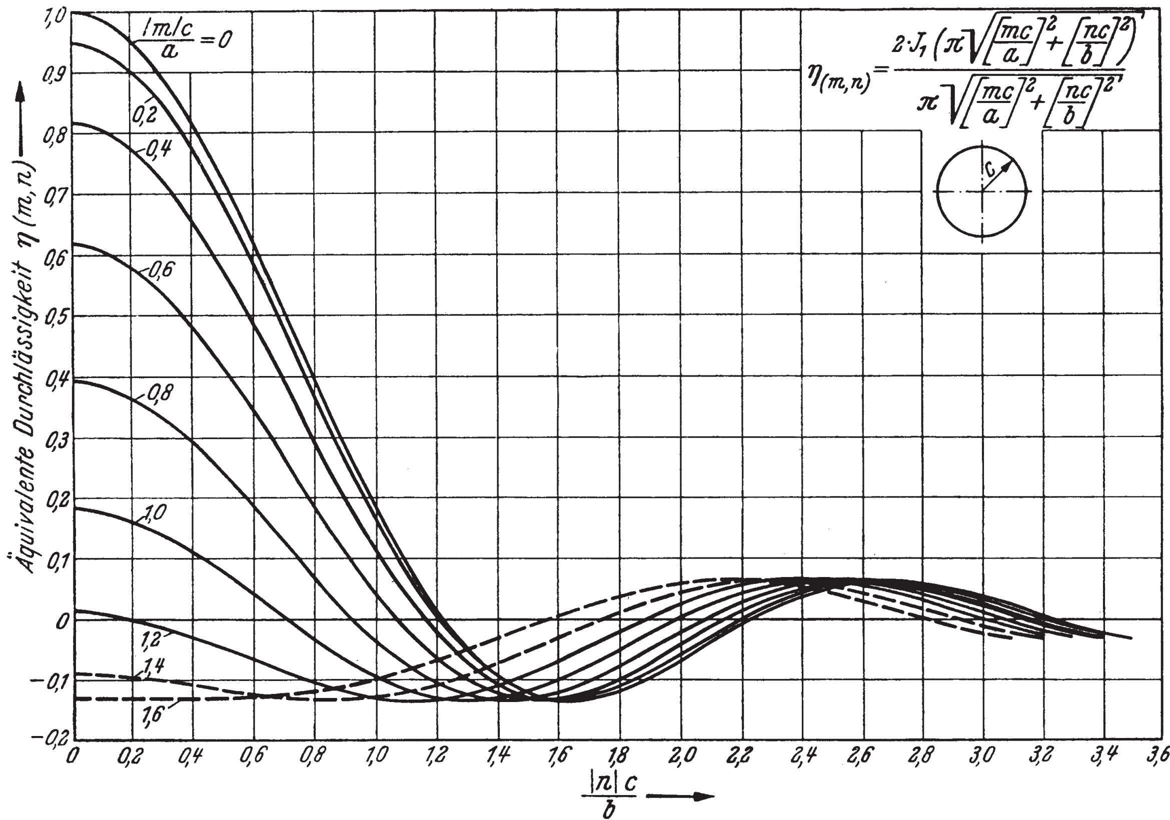


Abb. 195. Äquivalente Durchlässigkeit $\eta(m, n)$ der Kreisblende nach P. MERTZ und F. GRAY, V. [2]. a b Bildfeldmaße, J_1 BESSEL-Funktion 1. Ordnung, c Blendenradius.

das wir früher (vgl. Abb. 44) in einfacherer Weise ableiten konnten —, hat die Kreisblende hierbei noch eine merkliche Durchlässigkeit, und die gestrichelt hervorgehobenen Hüllkurven zeigen auch, daß beim Unterschreiten von $\eta_s(m, n) = 0$, d. h. beim Abtasten von Strukturen, deren räumliche Periode kleiner ist als die Blendenweite, die schädliche negative „Admittanz" (Phasenumkehr der entsprechenden Signalamplituden) geringeren Einfluß haben muß, als vergleichsweise bei der Rechteckblende. Was den Gang der Durchlässigkeit bei einer rautenförmigen Blende betrifft, sei auf das Original [2], Figur 22, verwiesen.

Der vom Abtastvorgang ausgelöste Sendestrom ist dem jeweiligen Lichtfluß Φ_s durch die Blende proportional und daher gegeben durch:

$$I(t) = K \cdot \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \eta_s(m, n)\, A_{m,n} \cdot e^{j\pi t\left(\frac{m u}{a} + \frac{n v}{b}\right)}, \qquad \text{(V.29)}$$

$$\text{mit } I(t) = K \cdot \Phi_s(t).$$

1e. Einfluß der Blende auf die Bildschrift in der zweidimensionalen Theorie.

Das Signal $I(t)$ des Senders steuert im Empfänger den jeweils die schreibende Blende durchfließenden Lichtstrom $\Phi_e(t)$. Der Index e bezieht sich auf die Empfangsseite. Wir nehmen eine lineare Abhängigkeit zwischen $\Phi_e(t)$ und $I(t)$ an und sehen von der Umwandlungskonstanten ab. Die Wirkung des gesteuerten Lichtstromes auf einen beliebigen Punkt x, y des Empfangsschirmes ist eine Aufhellung desselben, die sich aus der Integration über die Dauer ergibt, während welcher die zeitlich variable Belichtung jenes Punktes stattfand. Es entsteht also dort eine Helligkeit $H_e(x, y)$, deren Verteilung im allgemeinen der im Original bestehenden folgt, aber unter dem Einfluß der endlichen Blendenweite mit geringerer Durchmodulierung und mit der Möglichkeit des Verschwindens gewisser Komponenten. Dieses Empfangsbild wird wiederum als doppelte FOURIER-Reihe aufgefaßt; zu seiner Unterscheidung von der Senderseite seien die entstandenen Bildfeldkomponenten mit m', n' und die komplexen Amplituden mit $B_{m',n'}$ bezeichnet. Der Ausdruck für $H_e(x, y)$ lautet demgemäß:

$$H_e(x, y) = \sum_{m'=-\infty}^{m'=+\infty} \sum_{n'=-\infty}^{n'=+\infty} B_{m',n'} \cdot e^{j\pi\left(\frac{m' x}{a} + \frac{n' y}{b}\right)}, \qquad (V.30)$$

mit

$$B_{m',n'} = \frac{1}{4ab} \cdot \int_{-b}^{+b} \int_{-a}^{+a} H_e(x, y) \cdot e^{-j\pi\left(\frac{m' x}{a} + \frac{n' y}{b}\right)} dx\, dy. \qquad (V.31)$$

Welches sind dann die Beziehungen zwischen den m, n und den m', n'? Inwieweit werden die m, n des Originals durch letztere reproduziert?

MERTZ und GRAY knüpfen für diese Berechnung, deren Entwicklung und Begründung wir hier nicht in allen Einzelheiten wiedergeben können, an die Vorstellung an, die Abb. 189 veranschaulicht. Der das Empfangsbild schreibende endliche Querschnitt überfährt in geradliniger Spur die beliebig oft aneinandergereiht wiederholte Schirmfläche. Die nach Zurücklegen der Bildhöhe zwischen $+b$ und $-b$ übertragene Helligkeitsverteilung ergibt sich dann, wenn alle diese einzelnen Bildfelder zur Deckung gebracht werden. Ist die in der Blendenspur erzeugte Helligkeit $H_g(x, y)$, so kann Gl. (V.31) mit Rücksicht auf die ständige zyklische Wiederkehr der gleichen Welligkeit in der x-Richtung geschrieben werden:

$$B_{m',n'} = \frac{1}{4ab} \cdot \int_{-b}^{+b} \int_{-\infty}^{+\infty} H_g(x, y) \cdot e^{-j\pi\left(\frac{m' x}{a} + \frac{n' y}{b}\right)} dx\, dy. \qquad (V.32)$$

(Die Integrationsgrenzen sind zulässig, weil überall außerhalb der von der Blende belichteten Bahn die Helligkeit nach jeder Richtung Null ist.)

Denkt man sich nun wieder mit der Blende ein rechtwinkliges Koordinatensystem ξ, β fest verbunden und so gewählt, daß in diesem gilt:

$$x = \xi + u\,t; \quad y = \beta + v\,t, \qquad (V.33)$$

dann ist die jeweilige Belichtung eines im Bereich der schreibenden Blendenöffnung gelegenen Bildpunktes unter Weglassung konstanter Umwandlungsfaktoren:

$$T_e(\xi, \beta) \cdot I(t) = T_e(x - u\,t,\ y - v\,t) \cdot I(t). \qquad (V.34)$$

Demnach wird die Gesamthelligkeit im Punkte x, y des belichteten Bildstreifens ein Zeitintegral (TALBOTschen Gesetz):

$$H_g(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} T_e(x - u\,t,\; y - v\,t)\, I(t)\, dt. \tag{V.35}$$

Setzen wir dies in Gl. (V.32) ein, so ergibt sich nach zweckmäßiger Vertauschung der Integrationsfolge und Übergang zu dem mit der Blende verbundenen Koordinatensystem:

$$B_{m',n'} = \frac{1}{4\,a\,b} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{(-b-vt)}^{(b-vt)} \int_{-\infty}^{+\infty} T_e(\xi, \beta)\, I(t) \cdot e^{-j\pi t\left(\frac{m'u}{a} + \frac{n'v}{b}\right)} \cdot e^{-j\pi\left(\frac{m'\xi}{a} + \frac{n'\beta}{b}\right)} d\xi\, d\beta\, dt. \tag{V.36}$$

Dieser Ausdruck kann als Flächenintegral einer Funktion von β und t betrachtet werden. Es kommt dann auf dasselbe hinaus, ob man als Integrationsweg die b-Achse des Bildfeldes mit den Grenzen $(-b - v\,t)$ und $(+b - v\,t)$ wählt, während dabei t und $I(t)$ sich nicht ändern, oder statt dessen die t-Achse mit den Grenzen $\left(\frac{-b-\beta}{v}\right)$ und $\left(\frac{+b-\beta}{v}\right)$, während β konstant bleibt. Damit geht Gl. (V.36) über in:

$$B_{m',n'} = \frac{1}{4\,a\,b} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{(-b-\beta)/v}^{(+b-\beta)/v} \int_{-\infty}^{+\infty} T_e(\xi, \beta)\, I(t) \cdot e^{-j\pi t\left(\frac{m'u}{a} + \frac{n'v}{b}\right)} \cdot e^{-j\pi\left(\frac{m'\xi}{a} + \frac{n'\beta}{b}\right)} d\xi\, dt\, d\beta. \tag{V.37}$$

Um nun mit Hilfe dieses Ausdruckes das Gesetz der Übertragung sämtlicher m, n-Komponenten des senderseitigen Originalbildes zu finden, brauchen wir in Gl. (V.37) nur die Abhängigkeit des $I(t)$ von m, n nach Gl. (V.29) einzuführen. Die Beziehung Gl. (V.37) stellt also gewissermaßen die empfangsseitige Reproduktionsfähigkeit für eine gegebene Bildfeldkomponente m', n', als Funktion der durch ξ und β bestimmten zweidimensionalen Durchlässigkeit dar, die der bildschreibende Querschnitt besitzt. Sie ist zugleich die *Empfängercharakteristik*, mit welcher der Sendestrom $I(t)$ zu multiplizieren ist, um dessen Modulation durch die m, n-Komponente wiederzugeben. Setzen wir den Ausdruck für $I(t)$ ein, so folgt:

$$B_{m',n'} = \frac{A_{m\,n} \cdot \eta_s(m, n)}{4ab} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{(-b-\beta)/v}^{(+b-\beta)/v} \int_{-\infty}^{+\infty} T_e(\xi, \beta) \cdot e^{j\pi t\left(\frac{m-m'}{a}u + \frac{n-n'}{b}v\right)} \cdot e^{-j\pi\left(\frac{m'\xi}{a} + \frac{n'\beta}{b}\right)} d\xi\, dt\, d\beta. \tag{V.38}$$

In dieser Gleichung interessiert die Exponentialfunktion von t. Wenn wir uns an die Formel $e^{jx} = \cos x + j \sin x$ erinnern, so sehen wir, daß diese Exponentialfunktion in t periodisch ist. Der gleiche Zustand kehrt nun nach Durchlaufen der vollen Bildhöhe wieder, mit der Periode $t_0 = 2b/v$. Dies ist aber gerade die Dauer, über die wir nach Gl. (V.38) zu integrieren haben. Daher kann das dortige Zeitintegral geschrieben werden:

$$I = \int_0^{t_0} e^{j\pi t\left(\frac{m-m'}{a}u + \frac{n-n'}{b}v\right)} dt. \tag{V.39}$$

Da nach der Zeitdifferenz t_0, d. h. an der oberen und unteren Grenze der Integration, der gleiche Wert wiederkehrt, wird I nur dann nicht zu Null, wenn die ein-

geklammerte Summe selber verschwindet, also

$$\frac{m - m'}{a} u + \frac{n - n'}{b} v = 0 \tag{V.40}$$

ist. Das führt zu

$$I = t_0, \tag{V.41}$$

d. h. die Bildfeldkomponente m', n' erscheint mit *endlicher* Amplitude durch die Komponente m, n nach Maßgabe von Gl. (V.38) gesteuert, trotz unabhängiger Wahl der beiderseitigen Paare von Ordnungszahlen. Abgesehen von diesem singulären Falle findet keine Registrierung von m', n' mit Hilfe von m, n statt. Man wird ja auch a priori nicht erwarten, daß ein definiertes Paar m, n alle möglichen Paare m', n' im Empfangsbilde auslöst, muß vielmehr annehmen, daß diese letzteren im allgemeinen *nicht* entstehen, außer wenn ihre Beziehungen zu den senderseitigen m, n einem ganz bestimmten Gesetz gehorchen. Durch Gl. (V.40) ist dieses Gesetz gegeben, d. h. es muß

$$m' = m \quad \text{und} \quad n' = n$$

sein, damit die Übertragung zustande kommt.

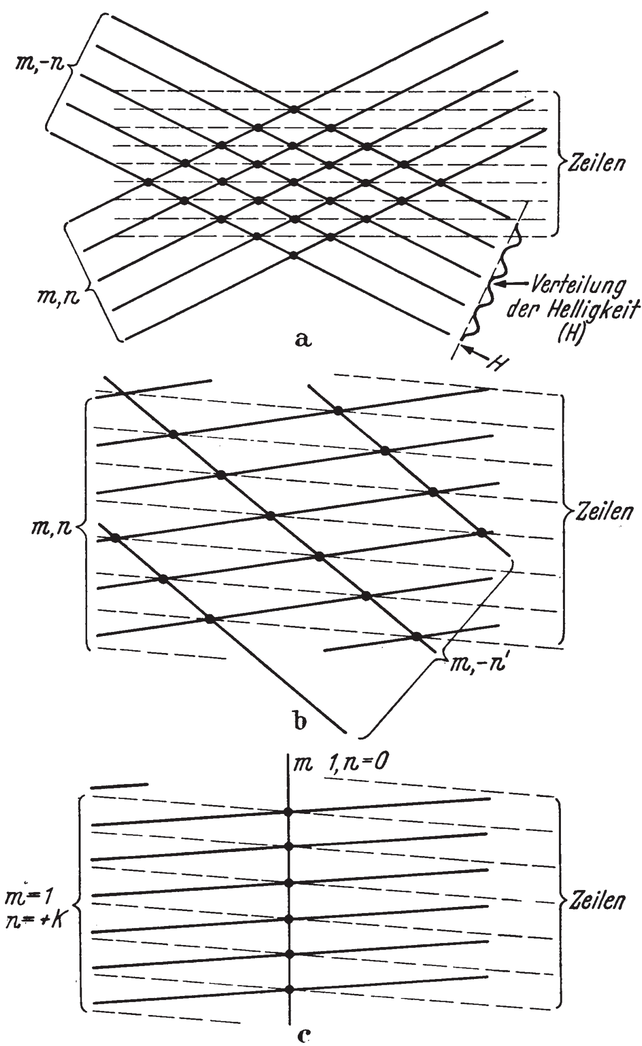


Abb. 196. Zur Veranschaulichung der Mehrdeutigkeit und der Fremdkomponenten im Empfangsbilde. Die Kämme der sinusförmigen Helligkeitswellen sind durch ausgezogene, die Mittelspuren der Zeilenbahnen durch unterbrochene Linien dargestellt. Fall a: Mehrdeutigkeit der Bildfeldkomponente m, n mit $m, -n$ (vgl. Abb. 192). Fall b: Die Bildfeldkomponente m, n des Originals erzeugt die Fremdkomponente $m, -n'$. Fall c: $m = 1$, $n = +k$ (Zeilenzahl) liefert die Fremdkomponente $m = 1$, $n = 0$.

Unerwartet war jedoch vor dem Erscheinen der zweidimensionalen Zerlegungstheorie folgende, aus Gl. (V.40) hervorgehende Tatsache: Es ist nicht nur die eine Lösung ($m' = m$, $n' = n$) dieser Gleichung möglich (vgl. Gl. [V. 13]), so z. B. liefert die Gleichheit:

$$\frac{m - m'}{a} u = \frac{n' - n}{b} v$$

oder

$$\frac{m' - m}{a} u = \frac{n - n'}{b} v \tag{V.42}$$

ebenfalls den Wert Null. Ferner ist $\frac{u}{a} = \frac{v}{b} k$, also geht Gl. (V.40) über in:

$$k \cdot (m - m') + n - n' = 0, \,* \tag{V.43}$$

* $(m - m')$ und $(n' - n)$ müssen n. V. ganze Zahlen sein; also gelten nur solche Werte von $(n' - n) \cdot a\,v/b\,u$, die ebenfalls ganzzahlig sind. Da nun $a\,v/b\,u = 1/k$ ist, müßte $(n' - n)$ für $(m - m') = 1$ den Betrag k, für $(m - m') = 2$ den Betrag $2k$ usw. haben. Mit $n' = k/2$ und $n = -k/2$ wird $(n' - n) = k$, also $(m - m') = 1$. Höhere $|n|$ und $|n'|$ entsprechen Strukturen, die durch Blenden endlicher Weite als normales Bild nicht mehr übertragen werden; es ist interessant, daß gerade derartige überfeine Strukturen zu ihnen mehrdeutige Grobstrukturen auslösen, sich also im Endergebnis nur als Störungen auswirken (vgl. Abb. 196c und Abb. 197).

was eine beliebige Vielzahl von Lösungen zuläßt. Wir hatten bereits früher gesehen, daß bei

$$m + \frac{n}{k} = m' + \frac{n'}{k} \tag{V.44}$$

eine und dieselbe Signalfrequenz, in der Empfangsschrift also Verwirrung entsteht. Die Gl. (V.44) ist mit Gl. (V.43) identisch. Wie Abb. 196a zeigt, tritt der Fall ein, wenn die Helligkeitswellen spiegelsymmetrisch gleiche Ordnung relativ zur Abtastzeile haben. Das Übertragungsmuster in Abb. 192 veranschaulicht aber nicht nur diesen, sondern darüber hinaus einen weiteren augenfälligen Effekt, den Abb. 196 b, c erklärt: Das Erscheinen der sog. „*Fremdkomponenten*" („extraneous patterns"). In der Tat muß ja die Zerlegung längs x grundsätzlich stets die gleiche Frequenz erzeugen, wenn die Scheitel verschieden orientierter Helligkeitswellen die Abtastzeile mit gleichen Abständen durchkreuzen. Es gibt also zu jeder Bildkonfiguration von periodischem Charakter eine Schar von Fremdkomponenten, und ein natürliches Bild kann deren viele auslösen. Welche davon besonders hervortreten, hängt von der Ordnung der normalen Komponenten und von den Eigenschaften der Blende ab, die das Empfangsbild schreibt. Wir nennen Bilder, bei denen $m' = m$ und $n' = n$ ist, *normal*. Ebenso, wie auf der Senderseite verschiedene Bildfeldkomponenten das gleiche Signal auslösen können, erzeugt eine bestimmte übertragene Frequenz im Empfangsbilde die ganze Reihe der nach Gl. (V.40) möglichen anomalen Bildfeldkomponenten.

Man unterscheidet zweckmäßig die Durchlässigkeit der Empfangsblende für normale und fremde Komponenten durch analog zur Sendeseite definierte $\eta_e(m, n)$ bzw. $\eta_e(m', n')$. Konstante Umwandlungsfaktoren weglassend, können wir dann die Amplitude der normalen Komponenten ausdrücken durch:

$$B_{m,n} = A_{m,n} \cdot \eta_s(m, n) \cdot \eta_e(m, n) \tag{V.45}$$

und die der im Original nicht enthaltenen, erst bei der Wiedergabe entstehenden Komponenten durch:

$$B_{m',n'} = A_{m,n} \cdot \eta_s(m, n) \cdot \eta_e(m', n'). \tag{V.46}$$

Da das auslösende Sendesignal in beiden Fällen identisch ist, können wir folgern, daß jede Komponente m, n oder m', n', für die das betreffende η_e nicht Null wird, nach Amplitude und Phase völlig unabhängig von allen übrigen außer ihr möglichen hervorgebracht wird. Das Empfangsbild stellt daher eine Überlagerung von normalen und fremden Komponenten dar. Beim Übertragen des normalen Bildes werden durch die Hintereinanderschaltung von Abtast- und Schreibblende die höheren Ordnungszahlen stärker gedämpft, was in Übereinstimmung mit den früher in Kap. III. 3d abgeleiteten Ergebnissen steht und gleichbedeutend ist mit schwächerer Wiedergabe der Feinstruktur. Die Fremdkomponenten äußern sich dagegen in regelrechter Verfälschung oder Verdeckung des Originals.

Naturgemäß erstreckt sich der Einfluß der endlichen Blendenquerschnitte auch auf die Schar der Fremdkomponenten, und zwar derart, daß diejenigen mit gröberer Struktur deutlicher hervortreten, als die feiner gegliederten. Eine im Original weiträumige Konfiguration wird durch die auf dem Empfangsschirm gleichzeitig entstehenden, mit ihr mehrdeutigen Feinstrukturen nicht erheblich beeinträchtigt, weil der Blendeneinfluß diese letzteren relativ stark dämpft. Rührt dagegen das gleiche Signal von einer abgetasteten Verteilung im Original her, die selber hauptsächlich höhere Ordnungen von m und n enthält, so sind die Fremdkomponenten im Empfang wieder mit gleichen Amplituden vorhanden wie im ersten Falle, aber deren gröbere Strukturen können jetzt die feineren normalen

Komponenten des Originals maskieren, mit deren Intensität überdies die der fremden Komponenten höherer Ordnung vergleichbar ist. Man unterscheidet dann nicht mehr, was zum Original gehört und was erst beim Wiedergabeprozeß als Störungsfigur hinzugekommen ist. Im Frequenzspektrum kann eine grobe Struktur, der eine Nebenlinie nahe bei der zugehörigen Hauptlinie entspricht, nur mit sehr feinen Komponenten, die also Nebenlinien in weitem Abstande von der benachbarten Hauptlinie erzeugen, mehrdeutig sein. Da nun die Energie der einzelnen Nebenlinien im umgekehrten Verhältnis zu ihrer Entfernung von der Hauptlinie steht, deren Seitenband sie bilden, wird verständlich, daß, je feiner die Struktur im Original war, desto deutlicher empfangsseitig die zu ihr mehrdeutige grobe Fremdkomponente sichtbar werden muß. Hinzu kommt, daß die Durchlässigkeit der das Bild schreibenden Blende für letztere größer ist. Dies macht die beträchtliche Störung begreiflich, die ein Empfangsbild durch das Erscheinen der Fremdkomponenten erleiden kann. Ein Beispiel dafür ist Abb. 197, die die bildtelegraphische Übertragung einer FRESNEL-Zonenplatte wiedergibt. Die Abtastrichtung verlief hierbei horizontal. Die Vermutung einer bloßen Echowirkung wäre fehl am Platze; es handelt sich tatsächlich um das Auftreten von Fremdkomponenten.

a



b



Abb. 197 a u. b. Zur Veranschaulichung des Entstehens von Fremdkomponenten nach P. MERTZ und F. GRAY, V. [2]. Übertragung des Bildes einer FRESNEL-Zonenplatte. a Original, b Wiedergabe. Abtastrichtung horizontal! Die untere Hälfte des Empfangsbildes b wäre auch bei Weglassung der oberen Hälfte des Originals in der gleichen Weise entstanden. Feine Strukturen, die in der Größenordnung der Zeilenrasterung liegen, liefern als Fremdkomponenten auffällige Grobstrukturen.

2a. Diskussion der bisherigen Ergebnisse, Reihenschaltung von Blenden.

Mit Hilfe der vorstehend entwickelten Gleichungen läßt sich die Übertragungscharakteristik definierter Blenden für gegebene Strukturen in *normalen* Bildern ($m' = m$, $n' = n$) berechnen. Sind die Blenden sende- und empfangsseitig gleich, so ist ihr resultierender Einfluß im wiedergegebenen Bilde durch $[\eta(m, n)]^2$ bestimmt; jedoch gilt das streng nur für ein Abtastsystem, dessen Auflösungsvermögen unabhängig ist von der Orientierung der betreffenden Komponente zur Blende. Immerhin ist auch bei Nichterfüllung dieser Bedingung allen in Frage kommenden Blenden gemeinsam, daß ihre Durchlässigkeit mit wachsender Ordnung von m und n abnimmt. In exakter Weise gehorcht eine Kreisblende dem Verlauf $[\eta(m, n)]^2$, weil bei ihr die Richtung der abgetasteten Helligkeitswellen ohne Einfluß ist auf die Übertragungsfunktion.

Abb. 198 zeigt die Durchlässigkeit zweier in Hintereinanderschaltung wirkender gleicher Kreisblenden mit dem Radius r (Abtast- und Schreibblende) für die Einzelheiten des normalen Bildes ($m' = m$, $n' = n$). Die Bildfeldkomponenten

hängen mit der angegebenen Wellenlänge wie folgt zusammen:

$$\lambda_{m,n} = 1 \Big/ \sqrt{\left(\frac{m}{2a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2b}\right)^2}\,. \tag{V.47}$$

Wie man sieht, werden Wellenlängen unterhalb der Größenordnung des Blendendurchmessers nicht mehr in merklichem Grade auf dem Empfangsschirm abgebildet.

Unter der praktisch stets erfüllten Bedingung, daß die Zeilen eine vernachlässigbar geringe Neigung gegen die x-Achse des Bildfeldes haben, ist $[\eta(m, 0)]^2$ ein Maß für die Wiedergabe der Komponenten des normalen Bildes in Zeilenrichtung und $[\eta(0, n)]^2$ ein Maß für die Wiedergabe senkrecht dazu. Die mit m, n wachsende Verminderung des Übertragungsmaßes der normalen Komponenten entspricht, wie schon früher erwähnt, der Wirkung eines unvollkommenen optischen Systems. Das gilt besonders für die Kreisblende. Das Bild eines hellen Punktes wird von einer Linse als rundes Beugungsscheibchen entworfen, dessen Größe sich bei nochmaliger Abbildung etwa verdoppelt. Analog vergrößert sich die „effektive“ — d. h. die aus der resultierenden Auflösung zu errechnende — Weite beim Hintereinanderschalten von kreisförmiger Abtast- und Schreibblende.

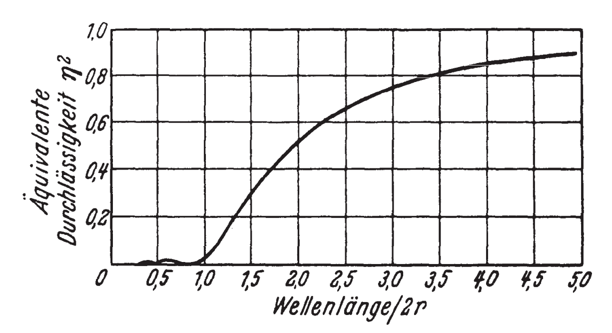


Abb. 198. Durchlässigkeit zweier in Hintereinanderschaltung wirkender Kreisblenden vom Radius r (Abtast- und Schreibblende). Die Wellenlänge λ ist durch die Bildfeldkomponenten m, n und die Bildabmessungen a, b bestimmt. Wellenlängen unterhalb der Größenordnung des Blendendurchmessers werden im Empfangsbilde nicht mehr in merklichem Grade wiedergegeben. Nach V. [2].

Wir kommen nun vom normalen Bilde zur überlagerten Störkonfiguration der Fremdkomponenten. Aus Gl. (V.43) ging hervor, daß das gleiche Signal im Prinzip deren beliebig viele erzeugen kann. Die Durchrechnung des Beispieles einer Rechteckblende, deren Höhe gleich der Zeilenbreite ist, zeigt aber, daß von dieser Vielheit mit merklicher Amplitude nur diejenigen vertreten sind, für welche die Beziehung gilt: $m' - m = \frac{1}{k}(n - n') = \pm 1$.

Mit wachsendem Wert von $(m' - m)$ nehmen die Amplituden der entsprechenden Fremdkomponenten rasch ab. Nur die 1. Fremdkomponente kann die gleiche Amplitude erreichen wie eine normale Komponente, besonders wenn $n \cong k/2$ ist, die zugehörige Spektralfrequenz also mitten zwischen zwei Hauptlinien fällt. Da in diesem Bereich, wie wir gesehen haben, kein *nützliches* Bilddetail übertragen wird, weil das normale Bild dort nur wenig Energie liefert, wäre es grundsätzlich möglich, ihn auszufiltern und so die störende Wirkung der genannten Fremdkomponenten zu vermeiden. Andererseits ist aus dem gleichen Grunde klar, daß die maskierende Wirkung derselben stark sein muß; denn sie ist durch das Verhältnis der schädlichen zur nützlichen Übertragungsleistung gegeben, das in der Mitte zwischen Hauptlinien den höchsten Wert erreicht.

Fremdkomponenten verdecken nicht nur die normalen Komponenten gleicher Frequenz, sondern wirken sich auch auf solche aus, die ihnen nach Wellenlänge und räumlicher Orientierung nahekommen. Die dadurch entstehenden Verluste nützlicher Information sind am größten in Bildrichtung und praktisch unmerklich in Zeilenrichtung. Demnach ist die Abtastung längs der Zeile besser geeignet, den optischen Nachrichteninhalt eines Bildes unverfälscht zu übertragen, als die Auf-

lösung quer zur Zeile. Eine ähnliche Folgerung war schon früher auf andere Art, und zwar auf Grund physiologischer Tatsachen (binokulares Sehen, Vorwiegen horizontaler Bewegungen) abgeleitet worden. Sie lautete dahin, daß es bei bestimmten Bildern vorteilhaft sein kann, die Wiedergabe von Detail längs der Zeile auf Kosten der vertikalen Schärfe zu verbessern. Diese Überlegung findet in der zweidimensionalen Zerlegungstheorie eine unvorhergesehene Stütze durch das Aufzeigen des Unterschiedes in der Störwirkung der Fremdkomponenten parallel und senkrecht zur Abtastrichtung.

2b. Bildschärfe, Einfluß der Fremdkomponenten und Kell-Faktor.

Ein relatives Maß der Schärfe des Fernsehbildes ist die Stufe der Erkennbarkeit bzw. die Modulationstiefe der feinsten im Original enthaltenen Struktur. Nach den Ausführungen in Kap. V. 2a spielen daher die Maskierungsverluste durch Fremdkomponenten eine wichtige Rolle. Für jede beliebige Blendenform werden sie um so schwächer, je mehr sich benachbarte Zeilen überlappen. Damit wird aber zugleich die Dämpfung der normalen Bildfeldkomponenten stärker, doch geht dabei die Blendenform merklich ein. Am günstigsten erwies sich in bezug auf diese Verhältnisse eine Blende mit Begrenzung ihrer Öffnung durch einen vollen Sinus und Überlappung der Zeilen im Betrage von $^2/_3$ seiner Breite (Abb. 200). Am ungünstigsten wirkte eine quadratische Blende ohne Überlappung. Die Amplituden der 1. Fremdkomponente verhielten sich in diesen beiden Fällen wie 1 : 13 (vgl. Abb. 199 u. 200); aber die Durchlässigkeit für die normalen n-Komponenten fiel bei der Sinusblende mit wachsendem n erheblich rascher ab als bei der quadratischen Öffnung.

Diese Zusammenhänge gehen aus den Abb. 199 bis 202 sehr anschaulich hervor. Sie zeigen die Amplitudengänge für die Haupt-Fremdkomponenten in ausgezogenen, für die höheren Fremdkomponenten in punktierten Linien; den Gang der Gesamtdurchlässigkeit für die normalen Bildfeldkomponenten geben die lang gestrichelten Kurven im unteren Teil wieder. Als Ordinate ist für die Fremdkomponenten das Produkt $\eta_s(m, n) \cdot \eta_e(m, n')$ und nicht $\eta_s(m, n) \cdot \eta_e(m', n')$ gewählt. Dies erschien zweckmäßig, um unabhängig von Form und Abmessung der Blenden stets die gleichen Parameterwerte $m\,c/a$ benutzen zu können. Die Differenz zwischen m' und m spielt bei den Zeilenzahlen, die heute im Fernsehen üblich sind, keine Rolle, denn die Bedingung für das Auftreten von Fremdkomponenten:

$$m' - m = \frac{1}{k} \cdot (n - n')$$

zeigt, daß nur $m' - m = \pm 1$ oder ± 2 interessiert. Der in Abb. 194 dargestellte Gang läßt aber erkennen, daß dann für eine gegebene Blende $\eta(m, n')$ nicht merklich verschieden sein kann von $\eta[(m \pm 1), n]$ bzw. $\eta[(m \pm 2), n']$. Die Berechnung der Durchlässigkeit für die normalen Komponenten erfolgte unter Voraussetzung der Gleichheit von Abtast- und Schreibblende nach Form und Abmessungen. Deshalb konnte, da für die normalen Komponenten $m = m'$, $n = n'$ gilt, als Ordinate das Quadrat $[\eta(m, n)]^2$ eingesetzt werden, es ist das Übertragungsmaß, das aus der Hintereinanderschaltung beider Blenden im Übertragungswege resultiert. Der Grenzfall $[\eta(m, 0)]^2$ definiert die Auflösung längs der Zeile, der ihm entsprechende $[\eta(0, n)]^2$ die Auflösung quer zu dieser. Wohlbemerkt steht in den Abb. 199 bis 202 die Abtastrichtung vertikal; Gestalt und Dimensionen der Blende sind in jedem dieser Diagramme eingezeichnet. Man erkennt ohne weiteres, daß mit wachsender Zeilenüberlappung die Fremdkomponenten immer mehr verschwinden, daß aber parallel damit die Durchlässigkeit

des Übertragungssystems für höhere n (und m) abnimmt. Sonach läßt sich auch die Vertikalschärfe aus diesen Bildern unmittelbar ablesen. Die quadratische Blende ohne Zeilenüberlappung (Abb. 199) und die Kreisblende mit 25% Zeilenüberlappung (Abb. 201) zeigen in bezug auf den Dämpfungsgang für die normalen Komponenten und den Amplitudenverlauf der Haupt-Fremdkomponenten ein sehr ähnliches Verhalten.

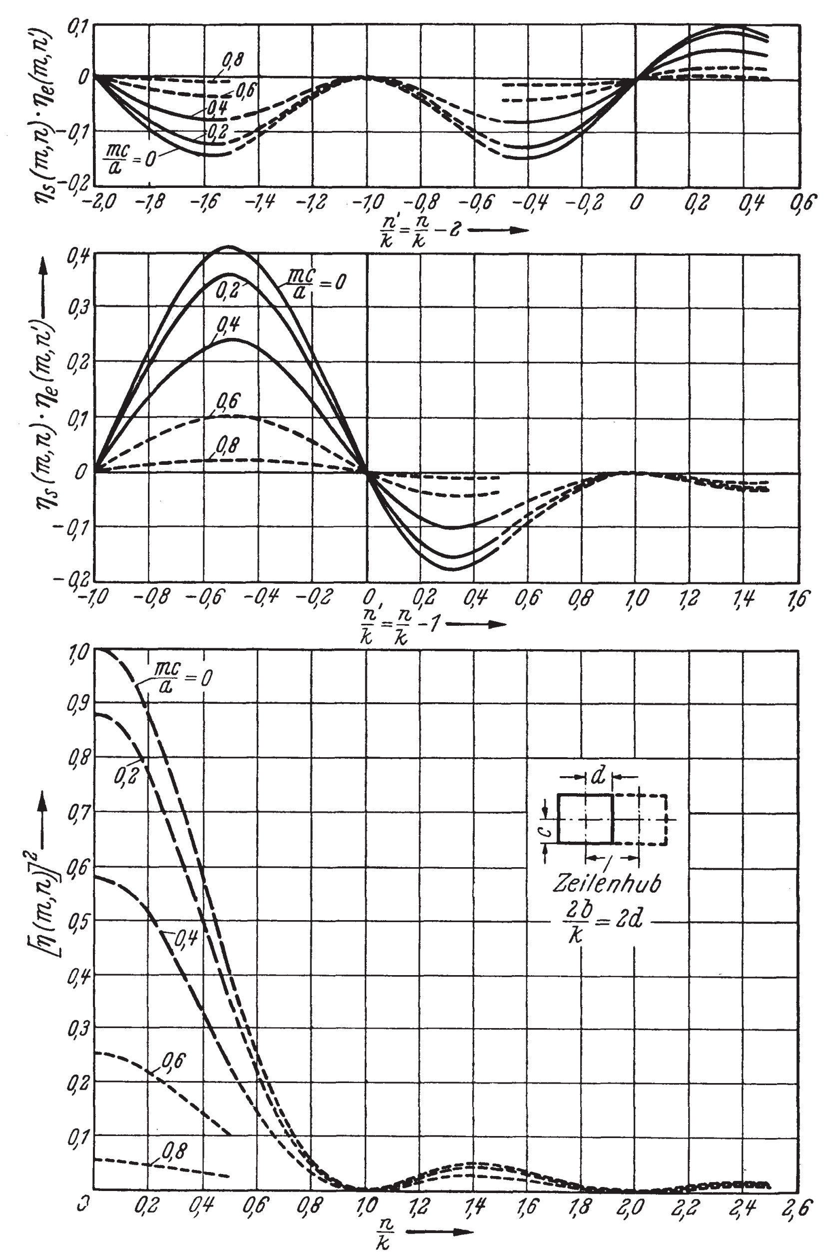


Abb. 199. Verhältnis der Amplitudenwerte von Fremdkomponenten und normalen Komponenten bei Hintereinanderschaltung von Abtast- und Schreibblende gleicher Größe, beide rechteckig, Zeilenhub $2b/k = 2d$, keine Überlappung der Zeilen. Der Amplitudenverlauf der Haupt-Fremdkomponenten ist in ausgezogenen, der der höheren Fremdkomponenten in punktierten, der der normalen Bildfeldkomponenten in lang gestrichelten Kurven ($[\eta(m, n)]^2$) dargestellt. $2b$ = Bildhöhe, k = Zeilenzahl. Nach V. [2].

Gleiche Wiedergabe der normalen Komponenten durch verschiedene Blenden bedeutet nicht, daß die Empfangsbilder im Aussehen vollkommen übereinstimmen; sie haben nur objektiv den gleichen Nachrichteninhalt. Dabei hängt es noch von der Blendenform ab, wie das Auge die Bildschärfe rein subjektiv bewertet. Ein gewisser Anteil von Fremdkomponenten kann bei passender Phasenlage relativ zu den maskierten normalen Komponenten, gewissermaßen

stellvertretend, größere Deutlichkeit vortäuschen, genau so, wie die durch Überschwingen an Hell-Dunkel-Kanten hervorgerufene „Plastik“ sich binnen gewisser Grenzen durch Betonen der Konturen als optisch nützlich erweist.

Die mit Blenden verschiedener Form infolge Maskierungsverlust durch Fremdkomponenten erreichbare vertikale Auflösung liegt in der Größenordnung der $1^1/_2$- bis 2fachen Zeilenbreite (vgl. Kap. IV. 11c). Es offenbart sich darin wieder der KELL-Faktor, den wir bereits in Kap. IV. 11d eingehend behandelt haben. Die Kurven in Abb. 199 und 201 lassen erkennen, daß $[\eta(m, n)]^2$ bei $n/k = 0{,}5$, also bei einem Raster von abwechselnd hellen und dunklen Bildzeilen, schon von $m\,c/a = 0{,}4$ ab sehr gering ist und bei $m\,c/a = 0{,}6$ und 0,8 auf die Größenordnung der Durchlässigkeit für die Fremdkomponenten abfällt. Im Falle starker Zeilenüberlappung — Abb. 200, 202 — und bei $n/k = 0{,}5$ ist der Wert von $[\eta(m, n)]^2$ bereits für $m\,c/a = 0$, d. h. bei unmodulierter Zeile, verschwindend. Er entspricht der Größe $\left[\eta\left(0, \frac{k}{2}\right)\right]^2$, stellt also die Durchlässigkeit in Bildrichtung für $n = k/2$ dar. Diese auf der Grundlage der zweidimensionalen Theorie berechneten Resultate decken sich mit der empirischen Beobachtung.

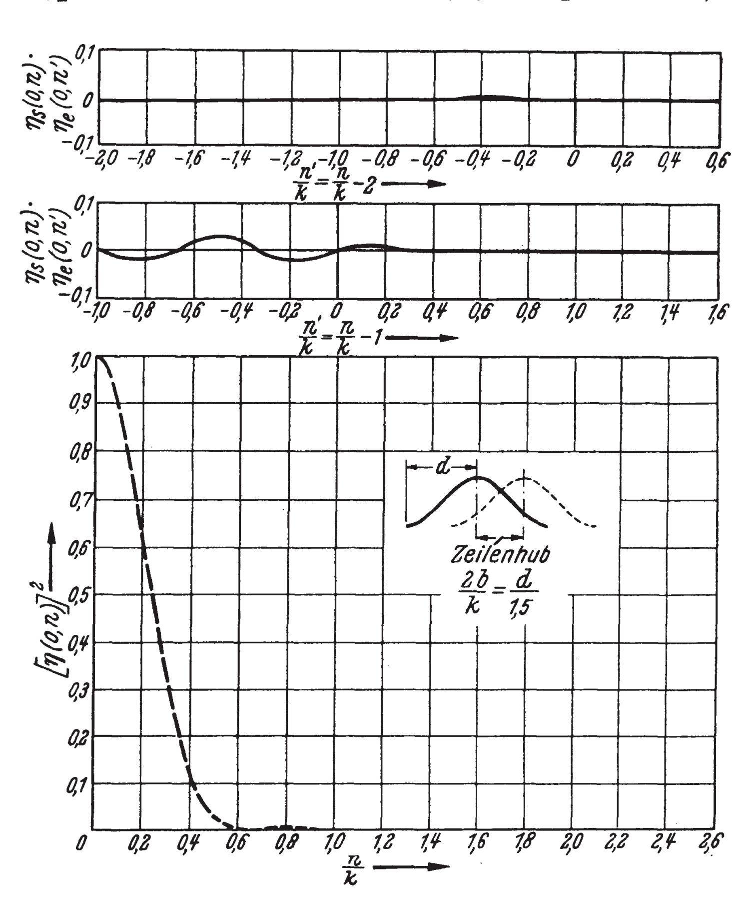


Abb. 200. Verhältnis der Amplitudenwerte von Fremdkomponenten und normalen Komponenten bei Hintereinanderschaltung von Abtast- und Schreibblende gleicher Größe, beide in Sinusform mit $^2/_3$ der Wellenlänge Überlappung der Zeilen. Unterscheidung der Komponenten und Bezeichnungen wie in Abb. 199. Nach V. [2].

Der Schachbrettvorstellung würden bei quadratischer Form von Blende und Bildfeld und Abtastung ohne Zeilenüberlappung folgende Ordnungszahlen der Grundfrequenz des Mosaiks entsprechen:

$$m = \frac{a}{2c}\,; \quad n = \frac{k}{2}\,;$$

und daher in Abb. 199: $m\,c/a = 0{,}5$; $n/k = 0{,}5$. Wir fragen nach der vertikalen Auflösung im normalen Bilde des Schachbrettes. Zur Durchlässigkeit der Blende tragen die Harmonischen $\left(\frac{n}{k} = \frac{3}{2}, \cdots\right)$ der Grundfrequenz, wie Abb. 199 zeigt, nur wenig bei; wir dürfen jene also vernachlässigen. Mit dem gegebenen Parameter $m\,c/a = 0{,}5$ folgt dann aus Abb. 199 eine Durchlässigkeit von schätzungsweise $^1/_6$ der maximalen, d. h. von $[\eta(0, 0)]^2$. Dies bedeutet für eine Rasterung, die aus k Zeilen mit längs einer Senkrechten abwechselnd weißen und schwarzen Bildpunkten besteht, eine erhebliche Verminderung der Aussteuerung des Hell-Dunkel-Sprunges und demnach ganz allgemein schwache Auflösung von feinen

Vertikalstrukturen, besonders wenn diese in der Intensität schon im Original wenig durchmoduliert sind. Nehmen wir nun weiterhin an, daß die horizontale Modulation Null, unser Bildfeld also aus gleichmäßig hellen und dunklen Zeilen mit der Ordnungszahl $n = 0{,}5\,k$ aufgebaut ist, so kommen wir zum Absolutwert der Vertikalauflösung. Aus Abb. 199 ergibt sich bei $n/k = 0{,}5$ für $m\,c/a = 0$ die Durchlässigkeit $\sim 0{,}41$. Nach Voraussetzung muß also, da es sich um die Hinter-

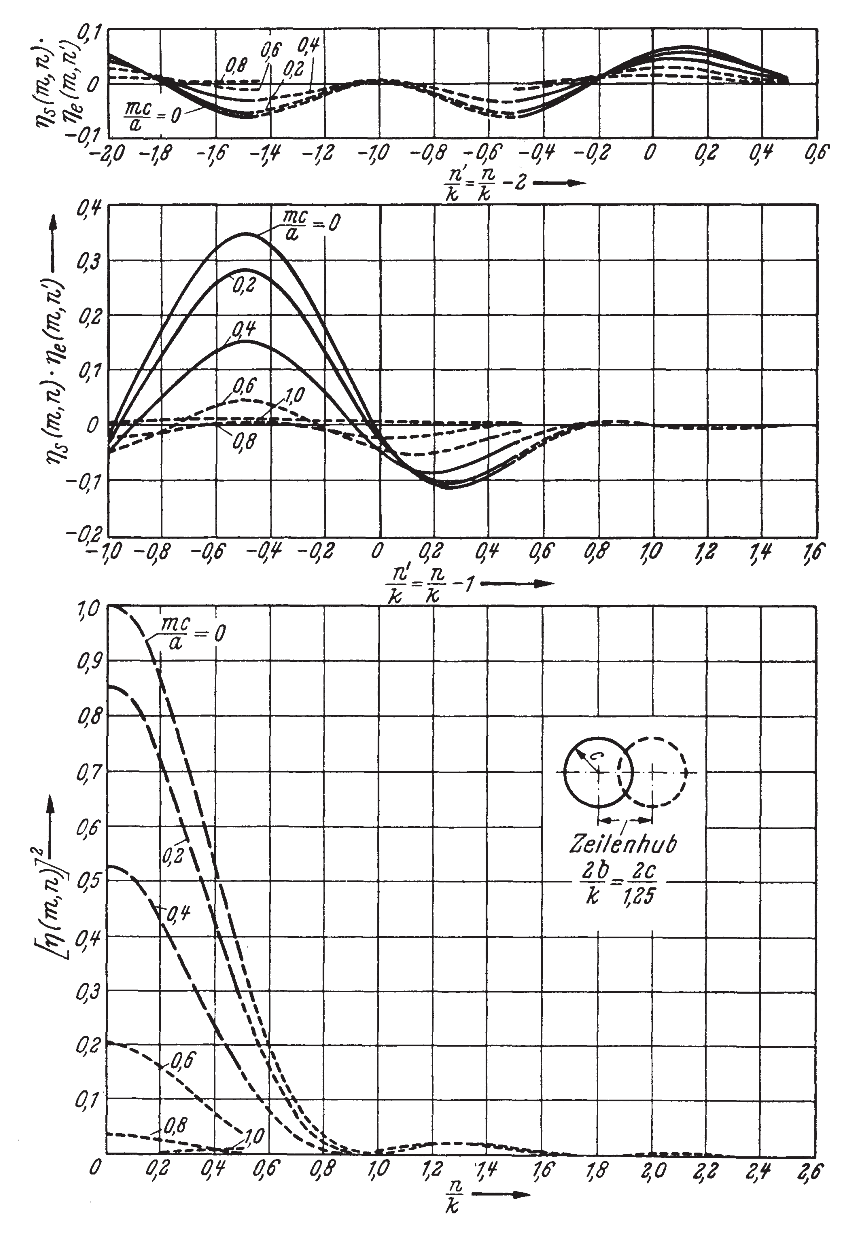


Abb. 201. Verhältnis der Amplitudenwerte von Fremdkomponenten und normalen Komponenten bei Hintereinanderschaltung von Abtast- und Schreibblende gleicher Größe, beide kreisrund mit 25% Überlappung der Zeilen. Unterscheidung der Komponenten und Bezeichnungen wie in Abb. 199. Nach V. [2].

einanderschaltung von Abtast- und Schreibblende handelt, die Durchlässigkeit der einzelnen Blende $\sqrt{0{,}41} = 0{,}64$ betragen. Diese Zahl stimmt in der Tat mit dem empirisch gefundenen KELL-Faktor überein. Die sich hieraus für das Frequenzband des Fernsehsignals ergebenden Konsequenzen haben wir bereits in Kap. IV erörtert.

Beim Betrachten der Abb. 199 bis 202 wird die der eindimensionalen Zerlegungstheorie fremde Rückwirkung der horizontalen und der vertikalen Struktur aufeinander deutlich. Die Integrationswirkung der flächenhaften Blende bringt

es infolge ihrer gleichzeitigen Verschiebung quer zur Zeilenrichtung mit sich, daß die im Original vorhandenen Änderungen der Leuchtdichte längs der Zeile, indem sie beim Abfragen derselben den jeweiligen Gesamtlichtfluß durch die Blende modulieren, sich mit berechenbaren Anteilen auf die empfangsseitig entstehende Vertikalverteilung der Helligkeit übertragen. Umgekehrt läßt die Abtastung der gegebenen Vertikalverteilung die Reproduktion der horizontalen Struktur nicht unbeeinflußt. Die Theorie von MERTZ und GRAY stellt den optischen Mechanismus dieses wechselseitigen „Übersprechens" klar und gestattet, aus dessen Gesetzen den diskontinuierlichen Bau des bei der Abtastung erzeugten Frequenzspektrums sowie die inhärenten Begleiterscheinungen der Mehrdeutigkeit und der Fremdkomponenten zu folgern. (Auf die Ausnutzung der leeren Bereiche des Fernsehspektrums kommen wir in Kap. V. 4a und im 2. Teilband zurück.) Sie gibt indessen keine Auskunft über die Verteilung der Sendeenergie auf die Schar von Harmonischen der Zeilen- und der Bildfrequenz in Abhängigkeit vom Bildinhalt. Daß ihr der statistische Charakter fehlt, zeigt sich am folgenden Beispiel:

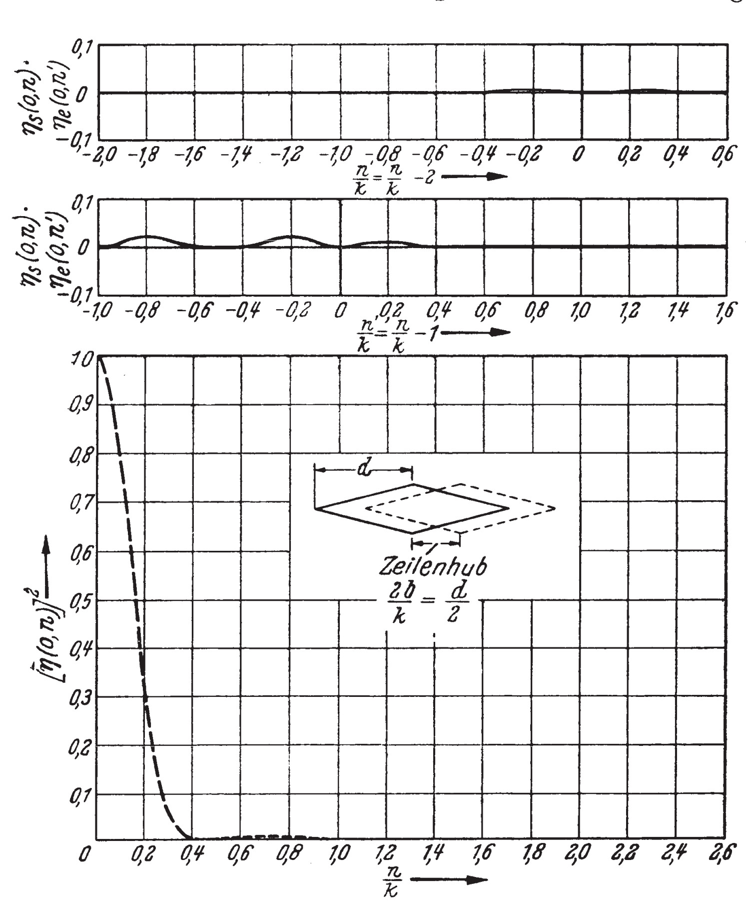


Abb. 202. Verhältnis der Amplitudenwerte von Fremdkomponenten und normalen Komponenten bei Hintereinanderschaltung von Abtast- und Schreibblende gleicher Größe, beide rautenförmig, mit $^3/_4$ der Diagonale Überlappung der Zeilen. Unterscheidung der Komponenten und Bezeichnungen wie in Abb. 199. Nach V. [2].

Wir haben aus Abb. 179A u. B, a, b den Einfluß der zufälligen Relativlage von Blendenspur und Bildfeld beim Übertragen des Schachbrettmusters von quadratischen Bildpunktelementen entnommen. Je nachdem, ob die Zerlegeröffnung in „richtiger" Höhe liegt (Abb. 179B, a), oder gegen diese Lage um halbe Zeilenbreite senkrecht verschoben ist (Abb. 179 B, b), findet sichtbare Wiedergabe des Musters mit gedämpfter Aussteuerung des Hell-Dunkel-Kontrastes oder seine völlige Auslöschung durch Verschmelzen zu einem mittleren Grau statt. Abb. 203b, c bringt diese Fälle nochmals zum Ausdruck, und zwar wiederum unter der Annahme, daß die Abtastbahnen $C - D$, $C' - D'$ bzw. $E - F$ parallel zu den horizontalen Grenzlinien des Schachbrettmusters verlaufen. H ist die auf dem Empfangsschirm resultierende Helligkeit. Sie folgt unter dem abrundenden Einfluß der Hintereinanderschaltung zweier Blenden bei b der regelmäßig periodischen Kurve II. Im Falle c aber ergibt sich, weil der beim Abtasten insgesamt wirksame Lichtstrom zeitlich unverändert bleibt, die Gerade III; die Modulation wird Null. Obwohl hier also m, n sowie Form und Durchlässigkeit der Blende [$T_\xi(\xi)$ bzw. $T_\beta(\beta)$ im Sinne von MERTZ und GRAY] definiert sind, ist das Ergebnis, wenn man alle möglichen räumlichen Zwischenlagen der Blendenspur zwischen

den durch b und c in Abb. 203 veranschaulichten Extremen berücksichtigt, *vieldeutig* und aus Abb. 199 nicht unmittelbar abzulesen. Die Zahl der Lösungen, die Gl. (V.19) unter Beachtung von Gl. (V.20) liefert, ist nämlich unbegrenzt, wenn wir die räumliche Phase der Blendentransparenz nach ξ und β gegen die m, n-Wellen der Helligkeit gleiten lassen, uns also vorstellen, daß wir den Bereich endlicher T-Werte innerhalb eines genügend weiten Öffnungsgebietes der Blende beliebig verschieben können; außerhalb dieses Bereichs wäre die Durchlässigkeit Null. Die Gesamtheit der zwischen b und c in Abb. 203 eingeschlossenen Fälle

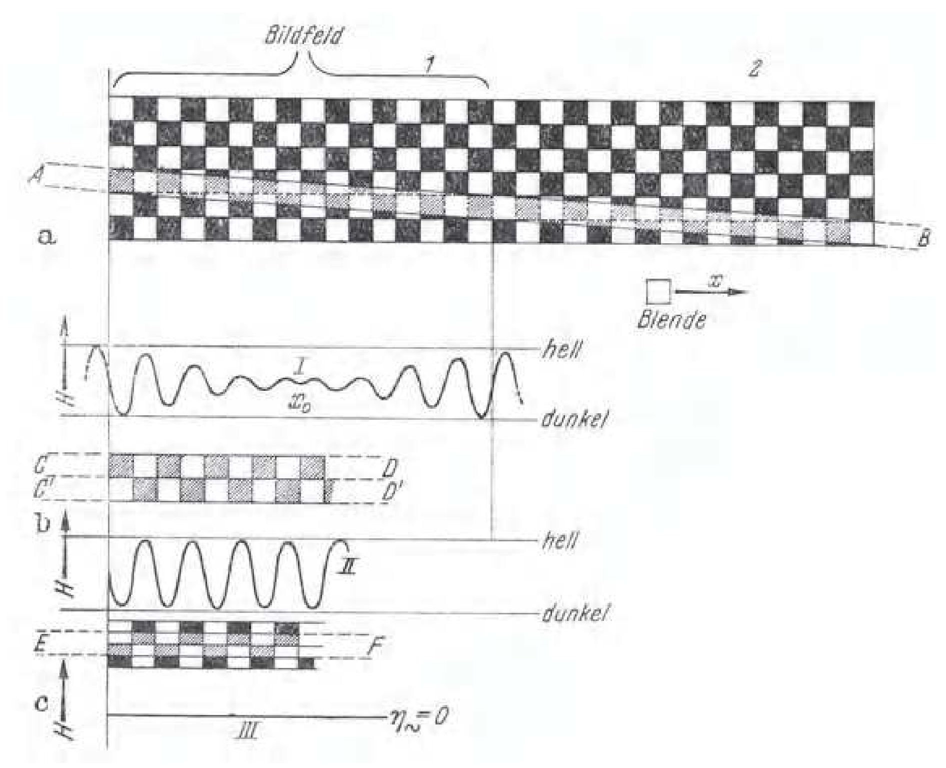


Abb. 203. Abhängigkeit der Übertragung eines Schachbrettmusters, dessen Felder die Größe des Bildelements haben, von der räumlichen Phasenlage der quadratischen Blende. Fall a: Abtastsignal bei Überqueren der Vorlage längs der Spur A—B, wobei das Bildfeld beliebig oft wiederholt gedacht ist (*1, 2*). Es ergibt sich für H im Empfänger (bei Vernachlässigung der Weite des Schreibquerschnitts) die Kurve I; die Modulation ist an den Rändern normal und verschwindet praktisch völlig bei x_0. Fall b: Die Abtastblende folgt den Bahnen C—D, C'—D' usw. Es entsteht das gleichmäßig durchgesteuerte Abtastsignal II, gute Wiedergabe im Fernsehbild. Fall c: Die Blendenspur ist in der Vertikalen um die halbe Höhe des Bildelements verschoben, ihre Bahn E—F. Das Signal wird Null ($\eta_\sim = 0$), keine Übertragung.

kann dann bei $m = 0$ unter der Bedingung hergeleitet werden, daß die von n abhängige Wellenlänge der Helligkeit zur Ausdehnung des endlichen T_β paßt. Die Rechenmethodik der zweidimensionalen Zerlegungstheorie gestattet bei dieser Annahme, alle jene Übergänge mit zu erfassen. Klarer geht dies aus folgender vereinfachenden Betrachtung hervor, die den Grundgedanken der Analyse nach MERTZ und GRAY respektiert:

Abb. 204 veranschaulicht die sinusförmige Vertikalverteilung der Helligkeit H im Falle $m = 0$ (konstantes H längs jeder Zeile) und $n = k/2$ (Raster von abwechselnd hellen und dunklen Zeilen). Harmonische der $n = k/2$ zugeordneten Signalfrequenzen dürfen unberücksichtigt bleiben, da ihre Phase im Bildfelde identisch mit derjenigen der Grundwelle festliegt und das Endergebnis nachstehender Überlegungen nicht beeinflußt. Die Blende ist quadratisch und hat in ihrer ganzen Öffnung konstante Durchlässigkeit. Es findet keine Zeilenüberlappung statt. Da nur die eine, durch n gegebene Wellenlänge von H maßgebend ist, entfällt die Summierung über verschiedene n, und wir können daher den von der Abtastblende erfaßten Lichtstrom unter den Verhältnissen der Abb. 204 bei Weglassung

des Proportionalitätsfaktors wie folgt ausdrücken:

$$\Phi_{(x,y)} = \frac{a_n}{2}\left(1 + \cos\frac{\pi\, y\, n}{b}\right)\cdot P\,, \tag{V.48}$$

wo $\frac{a_n}{2}$ den Amplituden-Halbwert der Helligkeit, b die halbe Bildhöhe, $P = 2c \cdot \frac{dT_\beta}{dx}$ das Produkt aus der horizontalen Blendenweite und dem n. V. konstanten Gradienten dT_β/dx darstellt. Wir setzen P willkürlich $= 1$. Wegen $n = k/2$ geht Gl. (V.48) über in:

$$\Phi_{(x,y)} = \frac{a_n}{2}\left(1 + \cos\frac{\pi\, y\, k}{2b}\right). \tag{V.49}$$

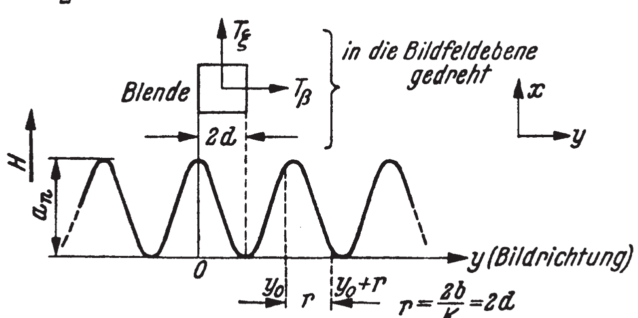


Abb. 204. Die vertikale Bildschärfe läßt sich nur durch einen Mittelwert definieren, der dem Bestehen gleicher Wahrscheinlichkeit der verschiedenen räumlichen Phasenlagen des bildzerlegenden Querschnitts relativ zur vertikalen Feinstruktur Rechnung trägt. Blende quadratisch mit den Transparenzen T_ξ und T_β, a_n Amplitude der n-Komponente, $2b$ Bildhöhe, k Zeilenzahl, $2d$ Blendenweite $= r$; y_0 und $y_0 + r$ Vertikalkoordinate der Blendenränder.

Nun bedeutet $\frac{2b}{k} = 2d$ die Zeilenbreite r $(= 2d)$, über die der Mittelwert von $\Phi_{(x,y)}$ zu bilden ist. Dabei läuft y von der beliebigen senkrechten Koordinate y_0 bis $y_0 + r$. Der Gesamtlichtfluß durch die Abtastblende ergibt sich demnach zu:

$$\overline{\Phi}_{\substack{(x,y)\\ \text{Blende}}} = \frac{a_n}{2}\left(1 + \frac{1}{r}\int\limits_{y_0}^{y_0+r} \cos\frac{\pi\, y}{r}\, dy\right) = \frac{a_n}{2}\left(1 + \frac{1}{\pi}\left[\sin\frac{\pi(y_0 + r)}{r} - \sin\frac{\pi\, y_0}{r}\right]\right). \tag{V.50}$$

Je nachdem, wie sich nun Blendenspur und H-Raster decken, liefern die Werte $y_0 = \frac{r}{2}, \frac{5r}{2}, \frac{9r}{2}, \ldots$ ein Minimum, die Werte $y_0 = \frac{3r}{2}, \frac{7r}{2}, \frac{11r}{2}, \ldots$ ein Maximum des in das Fernsehsignal umsetzbaren Lichtflusses, nämlich:

$$\overline{\Phi}_{(x,y)} = \frac{a_n}{2}\left(1 - \frac{2}{\pi}\right) \text{ bzw. } \frac{a_n}{2}\left(1 + \frac{2}{\pi}\right). \tag{V.51}$$

Der Fall der Auslöschung nach Abb. 203c liegt mitten dazwischen bei $y_0 = r$, $2r$, $3r$, ... Es ist dann:

$$\overline{\Phi}_{(x,y)} = \frac{a_n}{2}\,, \tag{V.52}$$

was infolge ständiger Wiederkehr von Zeile zu Zeile einer konstanten Helligkeit (Grau) über das ganze Bildfeld hinweg entspricht. Ist $m \neq 0$, so folgt für diesen letzteren Fall, daß sich der Wert des Integrals in Gl. (V.50) nicht ändert. Die übertragene Modulation ist dann in beiden Zerlegungsrichtungen Null. Alle übrigen möglichen $\overline{\Phi}_{(x,y)}$ berechnen sich nach Gl. (V.50) durch Einsetzen der nicht ausgezeichneten Koordinatenwerte von y_0 in diese. Das Ergebnis lautet also: Die vertikale Bildschärfe läßt sich nur durch einen *Mittelwert* definieren, der dem Bestehen gleicher Wahrscheinlichkeit der verschiedenen y_0 Rechnung trägt. Dies führt uns zurück zu der bereits in Kap. IV. 11d entwickelten Schlußfolgerung.

In Abb. 203a liegt der Verlauf der Blendenspur A—B schräg zu dem Schachbrettmuster kleinster quadratischer Flächenelemente. Das abzutastende Bild ist dabei im Sinne von MERTZ und GRAY beliebig oft fugenfrei wiederholt zu denken. Die Abtastbahn deckt sich am Anfang und am Ende jeder Zeile mit einem Felde des Schachbrettes. Nach dem S. 310 bezüglich der Fälle von Abb. 203b u. c

Gesagten ist nun ohne weiteres verständlich, daß der resultierende Helligkeitsverlauf der Kurve I folgen muß: Deutliche Modulation am Anfang und am Ende der Zeile, praktisch vollständige Auslöschung derselben in der Mitte bei x_0. Die Änderung des Lichtstromintegrals der quadratischen Abtastöffnung längs x ist qualitativ aus der Zeichnung direkt abzulesen. Ist die räumliche Anfangsphase der Blende relativ zum Schachbrettmuster verschieden von der in Abb. 203a gewählten, so liegt der Ort der Auslöschung bzw. Minimalamplitude von H_x an einer anderen Stelle der Zeile; er tritt aber stets auf, wenn die Schräge der letzteren die Größenordnung der halben Zeilenbreite erreicht oder übertrifft. Auch dieses, in der graphischen Darstellung von MERTZ und GRAY nicht explizite behandelte Phänomen offenbart die im üblichen Zerlegungsvorgang des Bildes beruhenden Grenzen für die mögliche Auflösung von Strukturen, die den Abmessungen der Blende nahekommen, und zwar insbesondere solcher, deren Gliederung nach *beiden* Koordinatenrichtungen einen hohen Grad von Feinheit aufweist.

3a. Das Frequenzspektrum beim Zeilensprungverfahren.

Wir beschränken uns auf den Fall *ungerader* Zeilenzahl. Wie schon in Kap. IV. 10a erörtert, ist dabei der Zeilenimpuls streng periodisch („durchlaufende" Zeile); vgl. Abb. 160. Dies hat für die Analyse nach MERTZ und GRAY den Vorteil, daß auf die Vorstellung von Abb. 189 zurückgegriffen werden kann.

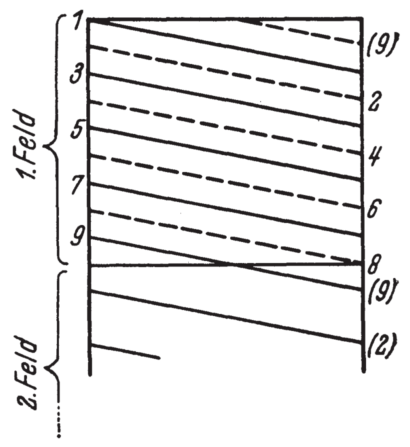


Abb. 205. Zeilenlage beim Abtasten mit Zeilensprung, k ungerade = 9. Die geradzahligen Zeilen sind im 1. Feld in unterbrochenen Linien gezeichnet. Die einzelnen Felder sind in Bildrichtung, fugenfrei aneinandergereiht, wiederholt zu denken. Nach H. KÖLLNER, V. [3].

Die von hier ab berichteten Erkenntnisse sind das Verdienst von H. KÖLLNER [3]; sie sind von P. MERTZ in einer späteren zusammenfassenden Darstellung der zweidimensionalen Theorie [2a] gebührend gewürdigt worden. Ein wie vorstehend definiertes Zeilensprungbild darf wie ein in der Zerlegungsebene unbegrenzt oft fugenfrei wiederholtes Bildfeld behandelt werden, das in unentwegt geradliniger Bahn von der Abtastblende ohne Phasensprung überfahren wird. Abb. 205 bringt dies zum Ausdruck. Es sind dort der Übersichtlichkeit halber nur 9 Zeilen angenommen; desgleichen in den folgenden Abb. 206 bis 209. Im realen Bildfeld wäre Zeile Nr. 9 am unteren Rande zur Hälfte abgeschnitten und ihr Rest am oberen Rande fortgesetzt zu denken. Im hypothetischen anschließenden Bildfeld läuft die Zeile Nr. 9 kontinuierlich weiter; ihr folgen (wie im realen Falle nach der Rückkehr des Strahls) vom linken Bildrande aus Nr. 2, 4, 6, 8 usw., unter stetigem Wechsel von ungeradzahligen und geradzahligen Zeilen. Im folgenden wird $k = 9 = 2p + 1$ gesetzt. Sinngemäß geht Gl. (V.11) über in:

$$\frac{u}{2a} = \frac{k}{2} \cdot \frac{v}{2b}; \qquad \text{(V.53)}$$

denn die Geschwindigkeit der Vertikalablenkung ist ja beim Zeilensprungverfahren verdoppelt. In Gl. (V.53) bedeutet $u/2a$ wieder die Zeilenfrequenz f_z; $v/4b$ ist die Bildfrequenz f_b und $v/2b$ die Feldfrequenz f_f. Demnach sind die Frequenzen des Signalstromes gegeben durch:

$$m \cdot f_z + n \cdot f_f \quad \text{oder} \quad m \cdot f_z + 2n\, f_b \quad \text{bzw.} \quad f_z \cdot \left(m + \frac{2n}{k}\right). \qquad \text{(V.54)}$$

Die Hauptlinien des Spektrums sind also mit Vielfachen der Feldfrequenz bzw. der doppelten Bildfrequenz moduliert. Da nun aber auf ein einzelnes Feld nicht mehr eine ganze Zahl von Zeilen entfällt, kommen die Linien des oberen Seitenbandes einer Hauptlinie nicht zur Deckung mit denen des unteren Seitenbandes der nächst höheren Hauptlinie; vielmehr sind jetzt diese Nebenlinien ineinander verschachtelt, wie dies Abb. 206 veranschaulicht. Der Abstand der Hauptlinien beträgt zwar ein ganzes Vielfaches von f_b, aber ein gebrochenes Vielfaches von f_f.

Mehrdeutigkeit tritt nun ein bei

$$m + \frac{2n}{k} = m' + \frac{2n'}{k} \tag{V.55}$$

oder

$$n' = \frac{k \cdot (m - m')}{2} + n. \tag{V.56}$$

Vgl. Gl. (V.43). Da n' als Ordnungsziffer nur eine ganze Zahl sein kann, während k nach Voraussetzung ungerade ist, muß $m - m'$ immer durch 2 teilbar sein, damit der Wert des Bruches in Gl. (V.56) eine ganze Zahl ergibt. Daher können

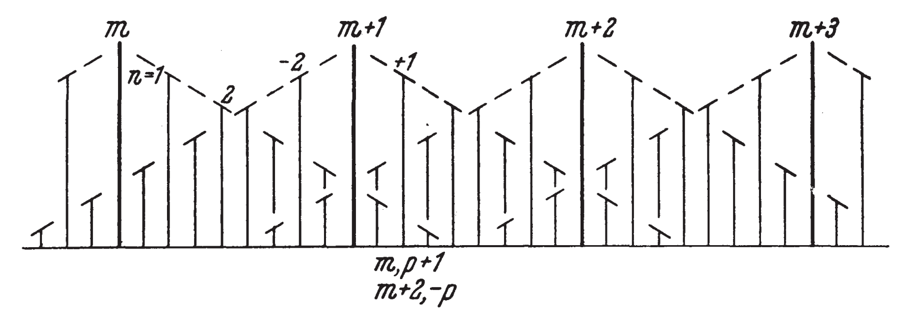


Abb. 206. Fernseh-Frequenzspektrum bei Zeilensprung; nach H. KÖLLNER, V. [3]. Zeilenzahl $k = 2p + 1 = 9$. Die Seitenbänder der Harmonischen m, $m + 1$, $m + 2, \ldots$ der Zeilenfrequenz sind jetzt aus Nebenlinien im Abstande $2f_b = f_f$ gebildet und füllen das Spektrum auf. Die Ordnungen m, $p + 1$ und $m + 2$, $-p$ fallen aufeinander.

Mehrdeutigkeiten beim Zeilensprungbild nicht zwischen den Seitenbandfrequenzen direkt benachbarter Hauptlinien zustande kommen (was $m - m' = 1$ entspräche); sie entstehen vielmehr zwischen den Seitenbandfrequenzen einer Hauptlinie und der übernächsten. Wir sehen z. B. in Abb. 206, daß die Komponenten $m, p + 1$ und $m + 2, -p$ die gleiche Signalfrequenz liefern. Während bei der klassischen Abtastung zwei benachbarte Nebenlinien zum gleichen Seitenband gehören, sind sie beim Zeilensprungverfahren Bestandteile der sich durchdringenden Seitenbänder verschiedener Hauptlinien. Im ersten Falle liegen die Nebenlinien, die von feinen Strukturen herrühren, nur in den von Energie leeren Räumen zwischen den Hauptlinien und von diesen beträchtlich entfernt, im zweiten Falle stets in der nächsten Umgebung einer vorausgehenden oder folgenden Hauptlinie, also dort, wo insbesondere bei gröberen Strukturen, denen Harmonische niederer Ordnung von f_z entsprechen, sich die Sendeleistung konzentriert. Aus dieser Tatsache ergibt sich im Vergleich zur klassischen Abtastung ein sehr unterschiedlicher Charakter der Mehrdeutigkeiten.

Einem (ungeradzahligen) Raster aus $k = 2p + 1$ abwechselnd hellen und dunklen Zeilen entspricht eine Bildfeldkomponente n von der Größenordnung $k/2 \approx p$. Beim Abtasten dieses Rasters mit normaler Zeilenfolge 1, 2, 3 ... kann die entstehende Signalfrequenz mehrdeutig sein zu vielen anderen Strukturen, die nach Gl. (V.13) möglich sind, indem die Differenz $(m - m')$ nacheinander wachsende Werte durchläuft. Betrachten wir davon nur den Fall $m - m' = -1$, so wird $n' = -(p + 1)$. Da p eine hohe Zahl ist, haben $n = p$ und $n' = -(p + 1)$

gleiche Größenordnung. Die Durchlässigkeit des aus zwei hintereinandergeschalteten Blenden nach Abb. 199 bestehenden Übertragungssystems beträgt für diese beiden Komponenten etwa 40% (das —-Vorzeichen von n' spielt keine Rolle, da die Kurven von Abb. 199 nach der Seite der —-Komponenten spiegelbildlich fortgesetzt zu denken sind). Die Mehrdeutigkeit ist, da normale und anomale Komponente gleich stark erscheinen, betont vorhanden. Tritt dagegen eine in Zeilenrichtung verlaufende Feinstruktur auf, so daß z. B. $m = p$, $n = 0$ wird, dann ergibt sich aus Gl. (V.13) bei $m - m' = 1$ für n' der Wert k bzw. $-n' = k$. Nach Abb. 199 ist für diese mit der gedachten waagerechten Feinstruktur mehrdeutige senkrechte Fremdkomponente die Blendendurchlässigkeit Null (auf die Blendenweite würde eine ganze Wellenlänge entfallen). Daher wird im Gegensatz zur vertikal orientierten Feinstruktur die Wiedergabe der horizontal orientierten *nicht maskiert* (vgl. die diesbezügliche Bemerkung S. 305).

Gleiches gilt, wie sich aus Gl. (V.55) und Gl. (V.56) herleiten läßt, beim Zeilensprungverfahren. In folgender Hinsicht zeigt sich jedoch ein wesentlicher Unterschied gegenüber der klassischen Abtastweise mit der Zeilenordnung 1, 2, 3 . . . Betrachten wir ein in horizontaler Richtung unmoduliertes Zeilenraster ($m = 0$), dessen Helligkeit in der Vertikalen eine ganze Sinuswelle durchläuft ($n=1$). Es handelt sich also um eine Grobstruktur. Nach Gl. (V.10 a) gehört zu $m = 0$, $n = 1$ die Signalfrequenz f_b, wenn die Abtastung ohne Zeilensprung erfolgt, und folglich kann hierbei f_b auf dem Empfangsschirm nicht mehr als die gedachte senkrechte Sinusverteilung reproduzieren, der die Bildfeldkomponente $n = 1$ entspricht. Gehen wir nun zur Zeilensprungmethode über, so offenbart sich ihr ganz andersartiger Charakter darin, daß die gleiche Frequenz f_b eine vertikale Feinstruktur zu übertragen vermag. In Abb. 207 ist dies veranschaulicht. Wiederum ist $k = 2p + 1 = 9$ angenommen. Dadurch, daß die 9. Zeile am unteren Rande hälftig abgebrochen und ihre 2. Hälfte am oberen Rande ausgeschrieben werden muß, um die Bedingung der Feldverflechtung zu erfüllen, tritt deutlich die Horizontalkomponente $m = 1$ auf. Die Vertikalkomponente ist $n = -p$. Beide sind in Abb. 207 durch Schraffierung erkennbar gemacht, wobei von der in Wirklichkeit sinusförmigen Struktur der Einzelwelle abgesehen wurde. Die zwischen den starken schwarzen Linien verlaufenden Zeilenbahnen werden in der zeitlichen Folge 1, 3, 5, 7, 9 (halb), 0 (halb), 2, 4, 6, 8 usw. zurückgelegt. Der Anfang der 1. Zeile ist völlig weiß, ihr Ende aber enthält schon etwas Schwarz; letzteres nimmt in der 3., 5. und 7. Zeile zu. Bei deren Auslauf (wie auch in der 1. Hälfte der 9. Zeile) wird nur Schwarz übertragen. Nun kehrt sich der Gang der Signalstärke um: im eingeflochtenen Felde, beginnend mit der 2. Hälfte der 9. Zeile, der Nr. 2, 4, 6, 8 folgen, wächst die Helligkeit, und am Ende der 8. Zeile ist wieder die volle Weißamplitude erreicht, mit der dann im nächsten Bilde Zeile 1 von neuem einsetzt. Vergegenwärtigt man sich (unter Beachtung der wahren Helligkeitsverteilung über die m, n-Einzelwellen), daß die

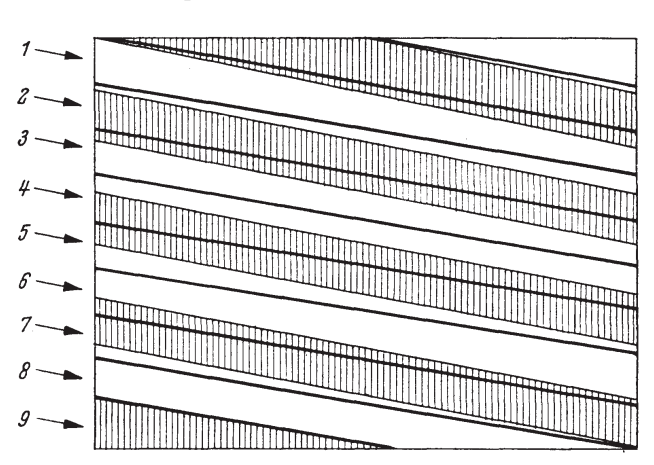


Abb. 207. Die Übertragung einer vertikalen Feinstruktur $n = p$ (bei $k = 2p + 1$) kann bei Zeilensprung durch die niedrige Bildfrequenz f_b erfolgen, mit der sich der Lichtstrom in der Abtastblende im Verlauf zweier aufeinander folgender Felder ändert. Die Zeilenspuren liegen zwischen den stark ausgezogenen Linien; die Schraffierung deutet die (in Wirklichkeit sinusförmige) Schwärzung an. Nach V. [3].

Signalstärke sinusförmig (bzw. cosinusförmig) mit der *Bildfrequenz* f_b ab- und zunimmt — denn am Ende des 1. Feldes, d. h. nach $^1/_{F0}$ sek, hat sie im Übergang von Weiß zu Schwarz gerade eine halbe Periode durchlaufen —, so wird also in der Tat die Feinstruktur $m = 1$, $n = -p$ (Schwarz-Weiß-Zeilenraster) allein von der tiefen Frequenz f_b übertragen.

Die Verwirrungsgebiete des Frequenzspektrums liegen beim Zeilensprungverfahren stets nahe bei einer Hauptlinie, nicht mitten zwischen je 2 Hauptlinien. Dieser Umstand erklärt die größere Anfälligkeit der Methode gegen Störkomponenten, zumal bei Hinzukommen von Bewegungen im Bildfelde, die naturgemäß eine zeitlich variable Verschiebung bzw. Modulation (Aufspaltung) der Frequenz-Spektrallinien bewirken.

3b. Einfluß von Bewegungen auf das Frequenzspektrum.

Bei den heutigen Werten der Bildfrequenz $f_b = 25\,\text{sek}^{-1}$ oder $30\,\text{sek}^{-1}$ und Zeilensprungübertragung sind Ausfälle von Bewegungsphasen[1] infolge zu rascher Vertikalverschiebung horizontaler Liniengebilde im Vergleich zu früher selten geworden. Da nämlich die Bildhöhe binnen $^1/_{50}$ bzw. $^1/_{60}$ sek durchlaufen wird, ist die Möglichkeit des Überholens der zeitlichen Zeilenfolge durch das von oben nach unten bewegte Objekt stark verringert. Wie die Erfahrung gelehrt hat, sind die Störungen der Wiedergabe, die auf solche Weise noch zustande kommen können, zu unbedeutend, um eine weitere Heraufsetzung von f_b zu rechtfertigen. Zu den Bildfeldachsen geneigte und vor allem senkrechte Linien können jedoch im Fernsehbild nach wie vor geometrische Verzerrungen erleiden, wenn ihre Verlagerung eine horizontale Geschwindigkeitskomponente von erheblicher Größe hat [*5*]. Freilich sind Bewegungen dieser Art, die mehr als etwa 25 Bildpunkte in $^1/_{50}$ sek durchmessen, in der Praxis nur bei Gesichtsfeldern zu erwarten, in denen der betr. Vorgang auch direkt betrachtet nicht mehr scharf erschiene (Rennwagen, Flugzeuge). Bei einer Bildhöhe von 500 Zeilenbreiten und einer waagerechten Verschiebung im Betrage von 25 quadratischen Bildelementen während der Dauer des einzelnen Zeilenfeldes, entsprechend 50 Bildelementen pro ganzes Bild, ist die scheinbare Schräge einer vom oberen bis zum unteren Bildrande reichenden Senkrechten etwa durch den Mittelwert von 37,5 Bildelementen gegeben; in Winkelgraden bedeutet dies 4° 20′. Man muß aber bedenken, daß das Phänomen sehr flüchtig ist, daß ferner ein stroboskopisches Verschmelzungsbild, nicht eine diskrete Reihe von schwach geneigten Einzellinien wahrgenommen wird und zudem meistens ein okularer Anhalt für das Erkennen der entstandenen Fehlorientierung fehlt, weil sämtliche im Gesichtsfeld bewegten Senkrechten die gleiche Schrägstellung erleiden. Abb. 208 gibt für den Fall der klassischen Abtastung ohne Zeilensprung die rein geometrische Analyse verschiedener Bewegungszustände einer durch das ganze Bild vertikal hindurchgehenden Geraden. Man ersieht daraus, daß in Übereinstimmung mit dem Ergebnis bei direktem Sehen die Umkehrphasen schärfer erscheinen, als die Momente schnellen Ortswechsels (Abb. 208a u. b). Abb. 208c entspricht einer sinusförmig pendelnden Horizontalgeschwindigkeit, bei der auflösbare Verschiebungen schon während der Dauer einer Zeile stattfinden. Sie hat für die vernünftigen Anwendungen des Fernsehens keine unmittelbare Bedeutung, zeigt aber die engen Grenzen, die für die Nahaufnahme sehr rasch kreisender Flugkörper und anderer Objekte durch den endlichen Zeitbedarf der Bildfeldzerlegung gezogen sind.

[1] Vgl. die Ausführungen in Kap. II. 4a.

Für das Farbfernsehen gelten die vorstehenden Feststellungen grundsätzlich unverändert, wenn dabei nach dem „Simultan“-Verfahren gearbeitet wird, d. h. Abtastung und Wiedergabe aller drei Farbauszüge gleichzeitig stattfinden. Werden diese letzteren jedoch nach der „Sequential“-Methode nacheinander mittels zyklisch wechselnder optischer Filter übertragen, so kann die geometrische Verzerrung des bewegten Bildes von Farbaufspaltung begleitet sein in Gestalt von bunten Säumen an den Hell-Dunkel-Grenzen und den Farbkanten, sobald deren Geschwindigkeit kritische Werte erreicht (vgl. Kap. II. 10a). Es kann dabei sogar zonenweise zu völligem Ausfall einzelner Farbkomponenten kommen. Von diesen Mängeln ist das Simultanverfahren frei.

Die Wiedergabe im Zeilensprungverfahren unterscheidet sich von der klassischen Übertragung durch die *Aufspaltung* der Verzerrung, die bereits an Hand von Abb. 157b erörtert wurde. Sie führt zur Verdoppelung aller mehr oder weniger senkrechten Linien bei rascher horizontaler Bewegung derselben. Der stroboskopische Effekt setzt diese geometrische Entartung durch Verschmelzen in diffuse Konturen um, was den Eindruck der optischen Schärfe merklich beeinträchtigt. Auch hierin liegt eine größere Anfälligkeit des Zeilensprungbildes im Vergleich zur früheren Zerlegungsmethode. H. KÖLLNER [3] hat nun für beide Arten der Übertragung nachgewiesen, daß neben der direkten geometrischen Bewegungsverzerrung eine indirekte auftritt, die sich aus der Mehrdeutigkeit des von der bewegten Struktur herrührenden Abtastsignals zu dem einer ruhenden Bildfeldkomponente erklärt. Seine Untersuchung sei hier kurz wiedergegeben:

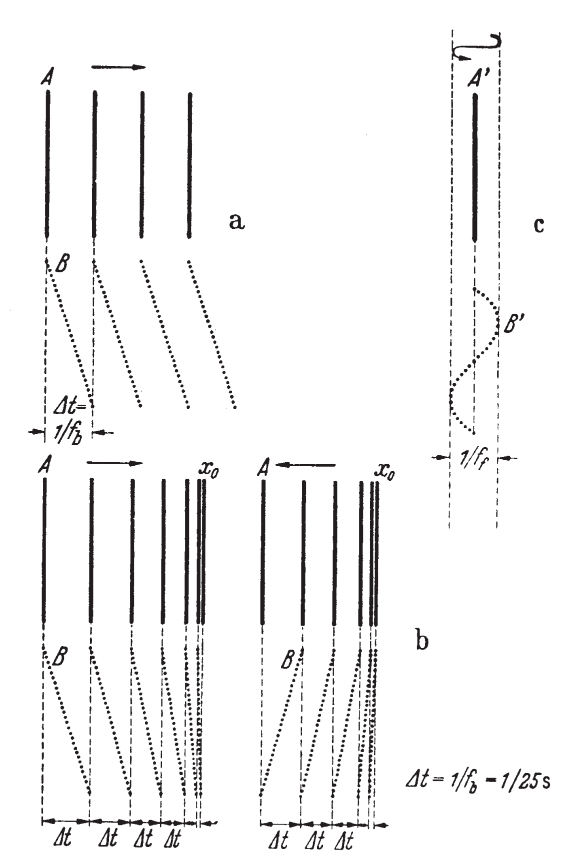


Abb. 208a–c. Zur Veranschaulichung der Verzerrungen im Empfangsbilde eines bewegten Vertikalstrichs A. Fall a: gleichförmige Horizontalverschiebung; $\Delta t = 1/f_b$ ist die Periode, mit der sich die schräggestellte Abbildungsfigur B im Bildfelde wiederholt. Fall b: sinusförmige Hin- und Herbewegung mit Umkehr bei x_0. Die Schräglage wird gegen die Umkehrphase hin geringer, die Abbildung scharf und unverzerrt im Wendepunkt. Fall c: Sehr rasche Horizontalschwingung von A', voller Hin- und Hergang des Vertikalstrichs während $1/f_f = {}^1/_{50}$ sek. Das Empfangsbild B' ist S-förmig verzerrt.

Die Lage einer Bildfeldkomponente m, n ist durch ihre Phase $\varphi_{m,n}$ bestimmt, die sich bei der Bewegung dieser Komponente zeitlich ändert. Demgemäß erhalten die komplexen Amplituden die Form:

$$A_{m,n}(t) = \frac{a_{m,n}}{2} e^{j\left(\varphi_{m,n} + \frac{d\varphi_{m,n}}{dt} t\right)} ; \tag{V.57}$$

vgl. Gl. (V.7). Der Quotient $d\varphi_{m,n}/dt$ ist eine Frequenz $\omega_{m,n}$, mit der wir für den Signalstrom erhalten:

$$I(t) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \frac{a_{m,n}}{2} e^{j\varphi_{m,n}} \cdot e^{j2\pi t\left(\frac{mu}{2a} + \frac{nv}{2b} + \frac{\omega_{m,n}}{2\pi}\right)} . \tag{V.58}$$

Das Klammerglied des Exponenten stellt eine *neue Frequenz* dar, die gegen die der ruhenden m, n-Komponente entsprechende Frequenz um einen von der

Bewegungsgeschwindigkeit abhängigen Betrag verschoben ist. Wenn letztere sich schnell ändert, wird die resultierende Linie des Spektrums diffus; bei passender Wahl einer konstant bleibenden Geschwindigkeit kann man jedoch eine solche Verschiebung der Linie erreichen, daß Mehrdeutigkeit mit einer anderen, ruhenden Komponente eintritt. Dies ist der Fall, wenn $\omega_{m,n}/2\pi$ ein ganzes Vielfaches von f_b wird, da f_b den kleinsten Linienabstand im Fernsehspektrum angibt.

Abb. 209 veranschaulicht schematisch, wiederum für 9 Zeilen, die Verzerrung der Bewegung eines vertikalen Streifens, der sich von links nach rechts verschiebt. Abb. 209a zeigt die Anfangsphase im Original, Abb. 209b die Wiedergabe bei der klassischen Zerlegung, Abb. 209c die Aufspaltung bei Zeilensprung. Während der Dauer eines ganzen Bildes $\Delta t = 1/f_b$ wird dessen Breite gerade einmal durchlaufen[1]. Wenn wir den ruhenden Streifen als schmalen Ausschnitt an dem ersten Scheitel einer horizontalen, um 90° phasenverschobenen Sinuswelle auffassen, deren Maxima im linken und rechten Bildrande liegen und von der wir den Rest unterdrückt denken, so hat die dem Streifen zugeordnete Bildfeldkomponente die Ordnungen $m = 1$, $n = 0$. In Abb. 209b sind diese Ordnungen durch die Bewegung verwandelt in $m = 1$, $n = -1$ (vgl. Abbildung 190). Beide Komponenten haben gleiche Sichtbarkeit. Der Fall von Abb. 209c ist komplizierter. Die Linien des Signalspektrums, die von den Komponenten $m = 1$, $n = 0$ und $m = 0$, $n = p$ herrühren, liegen im Abstand der Bildfrequenz f_b benachbart [Gl. (V. 54)]. Die Komponente $m = 1$, $n = 0$ wird nun durch den Bewegungsvorgang mit f_b moduliert, indem der Zeitpunkt, in welchem der Streifen von der Zerlegung erfaßt wird, sich von Zeile zu Zeile mit dem durch f_b gegebenen Rhythmus ändert. Dadurch fällt die Linie dieser Komponente auf die der Komponente $m = 0$, $n = p$ entsprechende. Die bewegte Grobstruktur $m = 1$, $n = 0$ wird mehrdeutig mit der ruhenden feinen $m = 1$, $n = p$ (Schwarz-Weiß-Zeilenraster). Abb. 210a ist entstanden, indem die Schnittpunkte der in Abb. 209c dargestellten Bewegung des Streifens mit den Zeilen des 1. und des 2. Zeilenfeldes durch Kreise markiert wurden. (Streifen- und Zeilenbreite sind hier zu Linien zusammengezogen, die Zeilenbahnen gestrichelt.) Abb. 210b zeigt die Schnittpunkte der Zeilen mit der ruhenden Feinstruktur $m = 0$, $n = p$, veranschaulicht durch die glatt durchgehenden Horizontalen. Die Signale werden in Abb. 210a u. b an der gleichen Stelle ausgelöst, sind also mehrdeutig. Das System verhält sich demnach, als ob die bloße Bewegung einer bestimmten Komponente m, n von selber eine neue erzeugt.

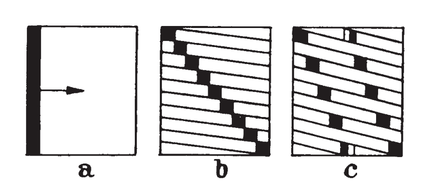


Abb. 209 a–c. Verschiedenheit des Bewegungseinflusses bei der Abtastung ohne und mit Zeilensprung. *a* Original, in Horizontalrichtung verschobener vertikaler Streifen, der während $1/f_b$ die Breite des Bildfeldes durchläuft; *b* Bewegungsverzerrung bei der klassischen Zerlegung mit normaler Zeilenfolge; *c* Aufspaltung bei Zeilensprung. Nach V. [3].

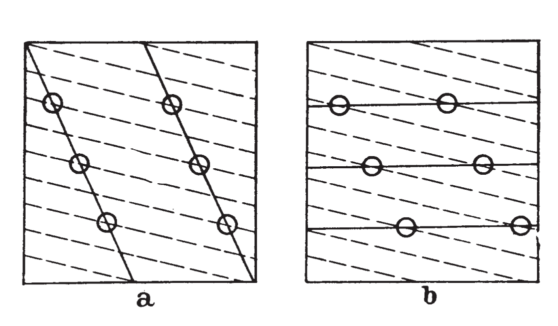


Abb. 210. Wirkung der Zeilensprungabtastung auf die Entstehung von Fremdkomponenten bei der Bewegung von Bildstrukturen. *a* normales Empfangsbild der gemäß Abb. 209c verzerrten Figur, die im Original (Abb. 209a) die Bildfeldkomponenten $m = 1$, $n = 0$ hat; *b* ist die dazu mehrdeutige ruhende Komponente $m = 0$, $n = p$. Zeilenzahl $k = 2p + 1 = 9$. Nach V. [3].

---

[1] Hier muß davon abgesehen werden, daß eine so große Geschwindigkeit in natürlichen Bildern entweder nicht vorkommt oder jegliche scharfe Wahrnehmung auch bei direkter Sicht unmöglich macht.

Der umgekehrte Fall wird durch Abb. 211 erläutert. Eine in der Ruhe durch $m = 0$, $n = p$ gekennzeichnete Feinstruktur liefert, wenn sie sich innerhalb der Bilddauer um $1/p$ der Bildhöhe nach oben verschiebt, das schräg nach rechts ansteigende, durch ausgezogene Linien dargestellte Weg-Zeit-Diagramm (Abb. 211a). Die Zeilensprungzerlegung wird durch die den beiden Feldern 1 und 2 zugeordneten gestrichelten Geraden als Weg-Zeit-Funktion ausgedrückt. Die Zeit schreitet hier in horizontaler Richtung nach rechts fort. Dann geben die Schnittpunkte des Systems ausgezogener Linien mit den beiden gestrichelten 1, 2 in Abb. 211a die Zeitpunkte an, in denen ein Signal entsteht. Damit sind

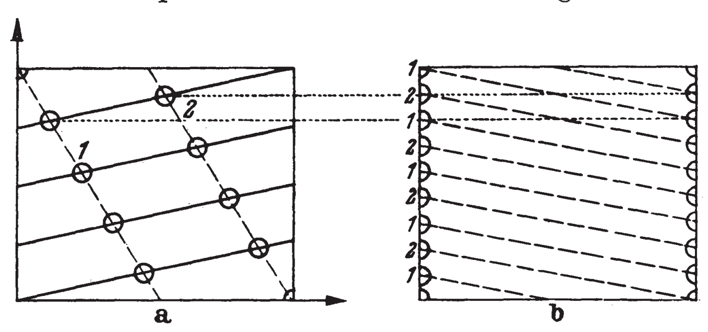


Abb. 211 a u. b. Wirkung der Zeilensprungabtastung auf die Entstehung von Fremdkomponenten bei der Bewegung von Bildstrukturen. a stellt eine vertikal nach oben bewegte Struktur $m = 0$, $n = p$ dar, wenn $k = 2p + 1$ (hier $= 9$) ist. Verschiebt sich diese Feinstruktur, die einem Raster aus abwechselnd hellen und dunklen Zeilen entspricht, während der Bilddauer um $1/p$ der Bildhöhe, so entsteht durch die Bewegung die zur Komponente $m = 0$; $n = p$ mehrdeutige ruhende Grobstruktur $m = 1$, $n = 0$. Nach V. [3].

im Bildfeld auch die Höhen (vertikal) festgelegt, in denen jeweils das Signal auftritt. Man überträgt diese Höhenwerte in das Zeilenraster Abb. 211b. Wie sich zeigt, liegen die Signale dann im 1. Felde an den Anfangs- und Endpunkten der es erzeugenden Zeilen, im 2. Felde desgleichen. Wir erhalten so die zu der bewegten Feinstruktur mehrdeutige ruhende Grobstruktur $m = 1$, $n = 0$. Deren Spektrallinie liegt mit derjenigen von $m = 0$, $n = p$ direkt benachbart, so daß auch hier wieder der Modulationsvorgang mit der Frequenz f_b das Aufeinanderfallen beider Linien erklärt.

Derartige Fälle treten selten ein, da die Koinzidenz der Linien die genaue Modulationsfrequenz f_b voraussetzt; aber das Entstehen von Mehrdeutigkeiten zwischen den Komponenten verschiedener bewegter Bildstrukturen ist wahrscheinlicher. Stets bleibt dabei die charakteristische Eigentümlichkeit des Zeilensprungverfahrens gewahrt, daß jeweils grobe und feine Strukturen miteinander mehrdeutig sein können. Die größere Durchlässigkeit der Blende für erstere vergrößert die Sichtbarkeit der Fremdkomponente und damit den Störeffekt. Bei speichernden Abtastern ist dieser durch die zeitliche Integrationswirkung vermindert, sofern die Bewegung der Feinstruktur schnell genug erfolgt, um über das gleiche Flächenelement der Speicherschicht innerhalb der Bilddauer abwechselnd helle und dunkle Phasen der verschiedenen Komponenten hinweglaufen zu lassen. Es erfolgt dann eine Mittelwertbildung über die Belichtung. Derartige Abtaster können also Bewegungen mit Vielfachen der Bildfrequenz nicht wiedergeben, und damit entfallen dann auch die von solchen Bewegungen sonst erzeugten Koinzidenzen im Frequenzspektrum, mit ihrem verwirrenden Einfluß auf das Fernbild.

4a. Weitere Betrachtungen des Fernseh-Frequenzspektrums; Nutzanwendungen, Grenzen.

Die energetische „Leere" des Fernsehspektrums hat vielfach dazu angeregt, mitten zwischen den Harmonischen von f_z andere Nachrichtenkanäle einzu-

flechten. In der Tat lassen sich jene Frequenzbereiche geringer Energie ohne Schaden für das wiedergegebene Bild nicht nur ausfiltern, sondern auch mit zusätzlichen Signalen belegen, die beispielsweise zur Steuerung des Gleichlaufs oder zur Übermittlung weiterer Bildeigenschaften, wie etwa der *Farbe*, dienen. Von F. GRAY selber [6] rührt der erste dahingehende Vorschlag her, der heute in Gestalt des doppelt modulierten, den Farbton und zugleich die Sättigung übertragenden „Hilfsträgers" (sub-carrier) beim NTSC-System verwirklicht ist. Nach dem vorstehend über den Bau des Spektrums Gesagten muß dieser Hilfsträger eine Schwingungszahl haben, die ein ungerades Vielfaches der halben Zeilenfrequenz f_z beträgt. Wir kommen darauf im 2. Teilband zurück.

Eine andersartige Nutzanwendung der energiearmen Bezirke des Fernsehspektrums wurde von R. B. DOME [7] vorgeschlagen. Sein Verfahren läuft auf eine Frequenzbandfaltung hinaus, zum Zwecke, ohne zusätzlichen Bandbreitebedarf mehr Bilddetail zu übertragen. Es stützt sich auf die Tatsache, daß die zur Vermeidung von Flimmern notwendige Wiederholungsfrequenz n des Bildpunktmosaiks eine Funktion des Gesichtswinkels ist, den der betrachtete Hell-Dunkel-Kontrast einnimmt. Feine Strukturen lassen die Herabsetzung von n auf 30 sek^{-1} zu, grobe erfordern das Doppelte, wenn das Bild bei großer Leuchtdichte flimmerfrei sein soll. Nach DOME wird das bei normaler Zeilensprungabtastung entstehende Frequenzband durch Filter aufgetrennt, und es werden die Teilbereiche desselben unter Benutzung von Transposition und trägheitsloser Umschaltung wie folgt behandelt: Ein der Grobstruktur entsprechendes Band von $0 \cdots 1{,}6$ MHz wird in beiden Feldern, d. h. 60mal/sek, übertragen. Ein zweites, sich von $1{,}6 \cdots 3{,}8$ MHz erstreckendes Band reicht bis zur Grenze des normalerweise durchkommenden Details; es wird nur in jedem 2. Felde ausgesendet. Die dazwischen liegenden Felder dienen als Vermittler der Hyperfeinstruktur, die von der Kamera bis zu etwa 5,3 MHz aufgelöst und als Signal abgegeben wird. Um die Kanalgrenze von 3,8 MHz nicht zu überschreiten, wird das Band $\sim 3{,}45 \cdots 5{,}3$ MHz durch Mischen mit einem Hilfsträger von rund 6,9 MHz, der die 875. Harmonische der halben Zeilenfrequenz $f_z = 15\,750$ Hz ist, in den Bereich $1{,}6 \cdots 3{,}44$ MHz transponiert. Er stellt das untere Seitenband des Hilfsträgers dar, worin das Bildspektrum invertiert auftritt. Empfängerseits wird diese Vertauschung im Wege der Mischung mit dem durch Ausfiltern und Verdoppeln der Frequenz $\sim 3{,}45$ MHz zurückgewonnenen Hilfsträger rückgängig gemacht und so das Band $\sim 3{,}45 \cdots 5{,}3$ MHz wiederhergestellt. Auf solche Weise kann die Hyperfeinstruktur in jedem 2. Felde von der Bildschreibröhre verzeichnet werden. Sie überlagert sich der in den Zwischenzeiten erscheinenden Feinstruktur und liefert bei flimmerfreiem Gesamteindruck einen Gewinn an Schärfe, der nach DOME einer 42proz. Vergrößerung der Zeilenzahl entspricht. Die aus dem Vorstehenden ersichtliche Überlappung der beiden Feinstrukturbänder trägt der Flankenform der Filter und dem Zweck der Rückgewinnung des Hilfsträgers (durch selektives Aussieben und Verdoppeln von $\sim 3{,}45$ MHz) Rechnung.

Bei der üblichen Bildsendung nach der Schwarzwertmethode moduliert, wie wir am Schluß von Kap. V. 1a gesehen haben, die mittlere Helligkeit H_m die Höhe des Zeilenimpulses, der dadurch gewissermaßen als Träger von H_m wirkt. D. A. BELL [8] hat darauf hingewiesen, daß die wirkliche unmodulierte Amplitude dieses Trägers einem mittleren Grau entspricht, von dem aus H_m sich in beiderlei Sinn ändern kann, nämlich zwischen den Anschlägen für die Extreme Weiß und Schwarz (am Schwarzwert). Nun ist aber die periodische Folge der Zeilenimpulse eine Rechteckwelle, gebildet von den Harmonischen der Grundfrequenz f_z. Tritt Bildinhalt auf, so ist H_m als von diesem moduliert zu betrachten. BELL faßt diese Beziehungen dahingehend zusammen, daß die *Summe* der

Harmonischen, die den Zeilenimpuls darstellt, in ihrer Gesamtheit zum „Träger" (Hilfsträger) des Bildinhalts wird. Da dieser sich beim Abtasten mit der Frequenz f_b wiederholt, müssen die Seitenbänder der so definierten Trägers Linien im kleinsten Abstande f_b sein, was mit den voraufgehenden Erkenntnissen übereinstimmt.

Quantitativ läßt sich mit f_z der gedachte Träger (Hilfsträger) in der Form schreiben:

$$A(t) = \sum_{m=0}^{m=+\infty} a_m \cdot \cos 2m\pi f_z t. \tag{V.59}$$

Wird ein unbewegtes Bild betrachtet, so ist n. V. bei klassischer Abtastung (ohne Zeilensprung) f_b die Grundfrequenz der Helligkeitsmodulation und daher das Bildsignal:

$$I(t) = \sum_{n=0}^{n=+\infty} i_n \cdot \cos 2n\pi f_b t. \tag{V.60}$$

Stellen wir uns zunächst vor, daß ein sinusförmiger Träger der Frequenz f_z von $I(t)$ bis zum Grade M ausmoduliert wird, so lautet sein Ausdruck:

$$\left(1 + M \cdot \sum_{n=0}^{n=+\infty} i_n \cos 2n\pi f_b t\right) \cos 2\pi f_z t.$$

In Wahrheit wird aber die durch Gl. (V.59) gegebene Reihe in jedem einzelnen ihrer Glieder ausgesteuert; daher können wir für den Gesamtvorgang und demnach für das vollständige Fernsehspektrum schreiben:

$$A(t) \cdot [1 + M \cdot I(t)] = \left(1 + M \cdot \sum_{n=0}^{n=+\infty} i_n \cos 2n\pi f_b t\right) \cdot \sum_{m=0}^{m=+\infty} a_m \cos 2m\pi f_z t$$
$$= \sum_{m=0}^{m=+\infty} a_m \cos 2m\pi f_z t + \frac{M}{2} \cdot \sum_{m=0}^{m=+\infty} \sum_{n=0}^{n=+\infty} a_m i_n \cos (m f_z \pm n f_b) t. \tag{V.61}$$

Dies ist der von MERTZ und GRAY auf andere Weise gefundenen doppelten FOURIER-Reihe gleichwertig, da die Summe $(m f_z \pm n f_b)$ identisch ist mit Gl. (V.10a). BELL macht aber auf die Folgerung aufmerksam, die sich ergibt, wenn man in Gl. (V.61) $n = 0$ setzt. Dann verschwindet die Bildmodulation, und es bleibt nur die Summe der Harmonischen von f_z übrig. Es werden also lediglich die Folge der Zeilengleichlaufimpulse und der Helligkeits-Mittelwert übertragen, der von a_m, i_n und M abhängt[1]. Dies zeigt deutlich, daß wir das Bild letzten Endes als eine, freilich sehr lange, Reihe von Harmonischen der Bildfrequenz f_b auffassen dürfen, in welcher die ganzen Vielfachen von f_z besonders ausgezeichnete Glieder darstellen. Sie sind die Sitze stärker konzentrierter Sendeenergie. Deren Verteilung gibt BELL wie folgt an:

Eine Rechteckwelle mit der Periode f_z und der Sprunghöhe a der Zeilenimpulse repräsentiert das Sendesignal des Fernsehgebers, wenn ein unmoduliertes, gleichförmig graues Zeilenraster übertragen wird (Abb. 212). Legt man

[1] Im Empfänger werden die Helligkeits- und die Gleichlaufsignale voneinander durch ein Amplitudensieb geschieden, das auf den Schwarzwert als Trenn-Niveau einregelt. Dieses Niveau ist als die Amplitude des gedachten Trägers anzusehen. Sie beträgt bei dem englischen System der BBC (British Broadcasting Corp.) 30% der Maximalamplitude des Senders, repräsentiert also 9% seiner Höchstleistung. Nimmt der Rücklauf 10% der Zeilendauer ein, so entfallen, da bei der benutzten positiven Modulation die Synchronisierimpulse den Antennenstrom auf Null tasten, $0{,}9 \cdot 9\% = 8\%$ der ausgesandten Leistung auf die Gleichlaufsteuerung, unter Vernachlässigung des Bildrücklaufs. Nimmt man für die Helligkeitsamplitude einen quadratischen Mittelwert von 65% des extremen Weiß an, entsprechend 42% der Höchstleistung, so verbleiben abzüglich der 8% Synchronisieraufwand 34% für die Bildmodulation, also ein Verhältnis $34 : 8 = 4^1/_4 : 1$.

hierbei den Zeitnullpunkt in die Mitte zwischen zwei benachbarten Zeilenimpulsen, so bilden die Harmonischen von f_z eine Cosinus-Reihe:

$$S = \sum_{m=1}^{m=\infty} \left[\frac{2a}{m\pi} \sin 2\pi m \frac{1-z}{2}\right] \cos 2m\pi f_z t, \tag{V.62}$$

wo der in eckiger Klammer stehende Faktor gleichbedeutend ist mit a_m in Gl. (V.59) und z den Bruchteil der Zeilendauer angibt, der auf den Rücklauf entfällt. Die Gleichstromkomponente ist $(1 - z)\, a$. Beim BBC-System ist $z = 1/10$. Daher wird

$$a_m = \frac{2a}{m\pi} \sin 0{,}9 \cdot m\pi. \tag{V.63}$$

Dies stellt den Amplitudenabfall mit wachsender Ordnungszahl m dar[1] und zeigt das Verschwinden der 10., 20., 30. usw. Harmonischen, da dann in der Sinus-

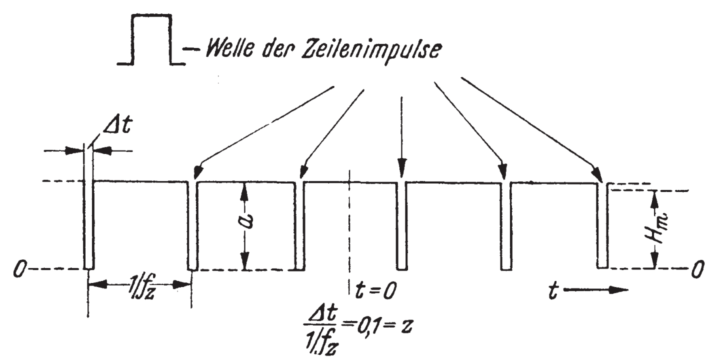


Abb. 212. Rasterwelle der Zeilenimpulse, die im Abstande $1/f_z$ aufeinander folgen und als „Träger" der mittleren Bildhelligkeit H_m wirken. Impulsdauer $\Delta t = z \cdot 1/f_z = 0{,}1/f_z$ · Höhe a Amplitude des Trägers, der als Summe von Harmonischen von f_z den gesamten Bildinhalt übermittelt. Synchronisierungsschema hier stark vereinfacht. Nach D. A. BELL, V. [8].

funktion ein ganzes Vielfaches von π auftritt. Die a_m sind negativ in den Bereichen, wo der Winkel $0{,}9\, m\pi$ im 3. oder 4. Quadranten liegt. Das Amplitudenspektrum des Trägers, wie er S. 321 definiert wurde, ist damit gegeben. Da wir in Gl. (V.62) a gemäß Abb. 212 von Null ab gemessen haben, enthalten diese Amplituden die Leistung, die zur Übertragung des Helligkeits-Mittelwertes H_m erforderlich ist, zusätzlich zu der für den Gleichlauf des Empfängers benötigten.

Gehen wir nun von der „Rasterwelle" nach Abb. 212 zu dem Falle über, daß sich infolge auftretenden Bildinhalts Seitenbänder des durch Gl. (V.59) beschriebenen Trägers entwickeln: Das Bildfeld werde mit 500 Zeilen und 25 Bildern ohne Zeilensprung abgetastet. Gemäß Gl. (V.63) wird die 250. Harmonische von f_z zu Null; die 245., für die der Sinusfaktor den Höchstwert 1 annimmt, hat die Amplitude $2a/245\pi$. Dies entspricht nur 0,4% der Amplitude von f_z und dieser gegenüber einem Leistungsunterschied von —48 db! Man kann nun fragen, von welchen Harmonischen von f_z eine längs der Zeile gegebene Feinstruktur übertragen wird. Bei den angenommenen Zerlegungsdaten hat die 245. Zeilenharmonische die Frequenz 3062500 Hz. Wird sie mit $3f_b$ moduliert, so entsteht eine Nebenlinie bei 3062425 Hz. Dieser Fall liegt vor, wenn das Bildfeld drei

[1] Da man jede sprunghafte Helligkeitsänderung als das eigentliche Aufbauelement des Bildes, unabhängig von der Größe des Sprunges, durch das FOURIER-*Integral* nach Gl. (IV.70) beschreiben kann, ergibt sich ohne weiteres aus der Form des Integranden, $\frac{1}{\omega} \sin \omega t\, dt$, der Abfall der FOURIER-Koeffizienten mit wachsender Frequenz, d. h. Ordnungszahl. Wenn man dann die Amplituden sämtlicher zur Deckung kommenden Frequenzen mit ihren Einzelbeträgen addiert, bleibt das Gesetz der Abnahme erhalten. Es gilt ganz allgemein auch für alle durch FOURIER-Reihen darstellbaren, periodischen Signale.

horizontale Streifen mit sinusförmiger vertikaler Helligkeitsverteilung enthält. An der Übertragung dieser Grobstruktur sind alle Harmonischen von f_z als Träger mit bei steigendem m fallender Amplitude beteiligt, indem jede der gleichzeitig vorhandenen entsprechenden Seitenbandfrequenzen $3f_b$, $(f_z \pm 3f_b)$, $(2f_z \pm 3f_b)\ldots$ zur Vermittlung des Informationsinhaltes dient. Eine Verkürzung des Frequenzbandes am oberen Ende macht dabei nichts aus, weil die Modulationsfrequenz $3f_b$ bereits in den Seitenbändern der Zeilenharmonischen niederster Ordnung mit fast der vollen Amplitude durchkommt. Für die horizontale Feinstruktur ist die Sachlage anders. Die mit $(245f_z - 3f_b)$ in der Frequenz (3062425 Hz) koinzidierende 122497. Harmonische von f_b entspricht einem längs der Zeile verlaufenden Hell-Dunkel-Punktraster nahe an der Auflösungsgrenze. Hier reicht schon die 1. Ordnung $(f_z + 122497\, f_b)$ bis zum oberen Ende des durchgelassenen Bandes, und nur wenige der nächst höheren Ordnungen, mit den Seitenbändern von $2f_z$, $3f_z \ldots$, gelangen noch zum Empfänger. Die verfügbare Kanalbreite wird dafür uneingeschränkt in Anspruch genommen. Hält man also an der Auffassung fest, daß der kleinste Abstand im Linienspektrum des Bildsignals f_b ist, und betrachtet man weiterhin die Helligkeitsverteilung längs der Zeile als Modulation von H_m mit hohen Harmonischen von f_b, deren Ordnungszahlen durch die Feinstruktur gegeben sind, so folgt, daß Träger dieser letzteren nicht große Vielfache von f_z sein können, sondern im Gegenteil nur die niedersten Zeilenfrequenzharmonischen (einschließlich deren Nullkomponente $0 \cdot f_z$); diese wenigen aber mit Seitenbandlinien sehr hoher Ordnung. Damit stimmt überein, daß die meiste Energie in jenen geringen Vielfachen von f_z enthalten ist. Denkt man sich die angenommene schwarz-weiße Punktfolge zwischen den Extremwerten der Helligkeit wechselnd und das Abtastsignal damit voll ausgesteuert, so wäre n. V. die 245. Zeilenharmonische mit ihrer minimalen Amplitude natürlich außerstande, dieses Modulationsintervall zu übertragen, und ebensowenig kommen dafür alle jene Zwischenordnungen in Frage, deren a_m nach Gl. (V.63) wesentlich kleiner ist als der gegebene Hell-Dunkel-Sprung.

Gl. (V.62) lehrt uns das charakteristische Eingehen der Rücklaufzeit in das Amplitudenspektrum des wahren Fernsehsignals und die exakte Verteilung der Sendeleistung auf dessen Frequenzen. Zu beachten ist dabei der durch dae Pendeln der Amplituden zwischen positiven und negativen Werten bedingts Phaseneinfluß; denn die spektrale Energieverteilung resultiert aus der vektoriellen Zusammensetzung der Amplituden, nicht aus der Addition ihrer Beträge.

Der Amplitudenabfall der Harmonischen von f_z mit wachsender Ordnungszahl derselben ist die Grundlage des zuerst von J. L. Delvaux [9] vorgeschlagenen, von M. de France weiterentwickelten „Tête-Bêche"-Systems, bei dem zwei nach der Restseitenbandmethode betriebene Fernsehsender mit ihren Bildträgern einander so nahe gerückt sind, daß das voll ausgestrahlte obere Seitenband des einen sich weitgehend mit dem voll ausgestrahlten unteren Seitenband des anderen überlappt. Es scheint so möglich, innerhalb von 20...25% mehr als der genormten Breite des Einzelkanals (s. Normen im Anhang) zwei unabhängige Bildsendungen unterzubringen. Der Leistungsunterschied der Zeilenfrequenzharmonischen muß dort, wo die Überlappung beginnt, zugunsten der gewünschten Sendung etwa 30 db betragen, ferner müssen der zweite Bildträger, wie alle weiteren Störträger, durch die Abstimmung des Empfängers genügend ausschaltbar sein. Bei Beachtung dieser Bedingungen soll die Wiedergabe, abgesehen von Zonen, in denen beide Bildträger etwa gleich stark einfielen, einwandfrei gewesen sein. Trotzdem erscheint es mit Rücksicht auf die erhöhten Anforderungen, die an den Empfänger gestellt werden, geboten, weitere praktische Erfahrungen mit dem Tête-Bêche-System abzuwarten.

In Gl. (V.10a) haben wir $u/2a$ als die Zeilenfrequenz f_z erkannt, indem u die Horizontalkomponente der Abtastgeschwindigkeit darstellt. Nach Abb. 213a können wir f_z durch die Periode P ausdrücken, mit der ein vertikaler Streifen A von der Blende waagerecht überquert wird; $P = 1/f_z$. Die Mittellinien der Zeilen sind mit 1, 2, 3, 4 bezeichnet, x ist die Abtastrichtung. Die Schnittpunkte zwischen 1, 2, 3, 4 und den Streifenrändern sind durch Verdicken hervorgehoben. Man sieht ohne weiteres, daß bei konstantem u im Falle der Abb. 213a die Periode der Signalerzeugung über beliebig viele Zeilen $1/f_z$ bleibt. Wird jedoch ein schräg stehender Streifen A nach Abb. 213b abgetastet, so ändert sich die Periode auf den Betrag $(1/f_z) + \Delta t$ oder, wenn die Neigung von A spiegelbildlich zu der gezeichneten wäre, auf $(1/f_z) - \Delta t$. Beziehen wir die Phase des entstehenden Abtastimpulses auf einen bestimmten Punkt, z. B. den Zeilenanfang, so können wir die Änderung der Periode auch als Phasenmodulation des Signals beschreiben. Sie erfolgt sägezahnförmig, da der Phasenwinkel von Zeile zu Zeile um einen konstanten Betrag zu- oder abnimmt und am unteren Bildrande dann wieder auf den Ausgangswert zurückspringt. Folglich tritt als modulierende Frequenz f_b auf, und wir haben, in Übereinstimmung mit den bisherigen Befunden, Seitenbänder von f_z in Abständen f_b, $2f_b$, $3f_b \ldots$ zu erwarten. Ist die horizontale Verteilung der Helligkeit über den Streifen nicht rein sinusförmig, so sind naturgemäß Multipla von f_z vorhanden, die gleichfalls Seitenbänder mit der Periode f_b aufweisen.

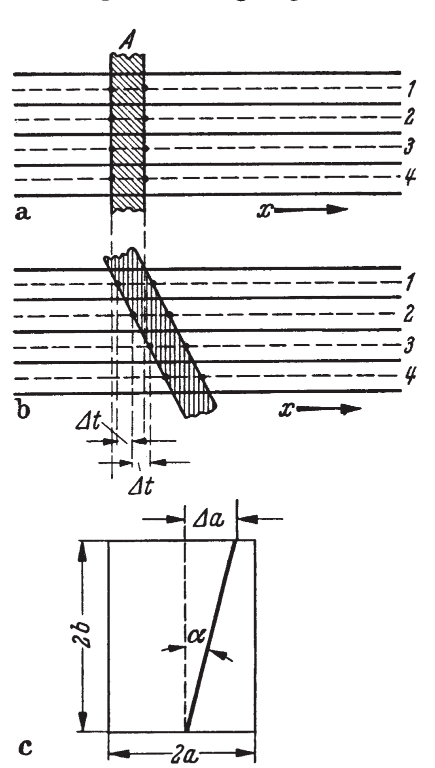


Abb. 213 a–c. Darstellung der Änderung Δf_z der Zeilenfrequenz beim Abtasten eines schräggestellten Streifens A. Zeilenmitten *1, 2, 3, 4* gestrichelt, x Abtastrichtung. Die Abtastperiode wird $(1/f_z) \pm \Delta t$. Teilbild c dient zur Ableitung der Gl. (V.64). Nach F. Winckel V. [*10*].

F. Winckel [*10*] hat für die in Abb. 213c veranschaulichten Bedingungen die Änderung von f_z in Abhängigkeit von α wie folgt angegeben:

$$\frac{\Delta f_z}{f_z} = \frac{\frac{b}{a\,k} \cdot \operatorname{tg} \alpha}{1 - \frac{b}{a\,k} \operatorname{tg} \alpha}, \tag{V.64}$$

wo k die Zeilenzahl des Bildfeldes bedeutet. Die m-Komponente ist hier $= 1$. Da k stets Werte > 100 und $\frac{b}{a}$ die Größenordnung 1 hat, vereinfacht sich Gl. (V.64) für nicht zu große α wie:

$$\frac{\Delta f_z}{f_z} = \frac{b}{a\,k} \cdot \operatorname{tg} \alpha. \tag{V.65}$$

Im Intervall $\alpha = 0° \ldots \pm 85°$ erreicht dann bei $b = a$ die maximale Frequenzänderung den Betrag $\Delta f_z = 0 \ldots \pm f_z$. Für kleinere k wird die Auffüllung des Spektrums zwischen den Hauptlinien durch Δf_z erheblich vollständiger. Gleiches gilt für wachsende Werte der m-Bildfeldkomponenten. Dies ergibt sich nach Winckel [*10a*] auf Grund folgender Überlegungen:

Während Mertz und Gray die m, n sich sprunghaft ändern lassen, d. h. von vornherein eine diskontinuierliche Helligkeitsverteilung oder, besser gesagt, eine *Rasterung* als gegeben ansehen, bezieht sich die Darstellung in Abb. 213c auf eine *stetige* Änderung des Neigungswinkels α um unendlich kleine Beträge. Folglich kann sich $\Delta f_z/f_z$ auch nur kontinuierlich ändern: Das Linienspektrum geht

in einen bandenartigen Aufbau über. Man bedenke, daß mit wachsendem m und n die Nebenlinien zwar den absoluten Abstand f_b beibehalten, aber im Verhältnis zur Frequenz der zugehörigen Hauptlinie immer mehr aneinanderrücken. In Prozenten dieser Frequenz ausgedrückt, wird dabei die Abweichung von ihr zunehmend kleiner. Aber die Lücken zwischen den Harmonischen von f_z bleiben natürlich bestehen, solange n den Wert $k/2$ unterschreitet. Was geschieht nun, wenn wir den einen Streifen in Abb. 213 vervielfachen, m also beträchtlich groß werden lassen? Um dies zu übersehen, hat WINCKEL m als Parameter in die Gl. (V.64) eingeführt. Dann wird $\Delta f = f' - m\,f$, wo f' die im Sinne von Abb. 213c veränderte Frequenz der Hauptlinie $m\,f$ darstellt, und es ergibt sich:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{m \cdot \frac{b}{a\,k} \cdot \operatorname{tg} \alpha}{1 - \frac{b}{a\,k} \operatorname{tg} \alpha} \simeq m \cdot \frac{b}{a\,k} \cdot \operatorname{tg} \alpha. \tag{V.66}$$

Das Ergebnis wird durch Abb. 214 in sehr lehrreicher Weise für wachsendes α veranschaulicht; es gilt:

Kurve 1 für $m = 1$
,, 2 ,, $m = 10$
,, 3 ,, $m = 50$ = Schachbrettfrequenz f_{sch} für $k = 100$.

Wir entnehmen aus Gl. (V.66) und Abb. 214 z. B. für $\alpha = 80°$, daß bei

$m = 1$ ein Gebiet von $0{,}05 \cdot f$
$m = 10$,, ,, ,, $0{,}57 \cdot f$
$m = 50$,, ,, ,, $2{,}835 \cdot f$

beansprucht wird. (Die Kurven von Abb. 214 gelten für jede beliebige Auflösung, wenn man sie sämtlich auf die Grenzkurve der Schachbrettstruktur bezieht, die dem ausgezeichneten Falle der $k/2$ Vertikalstreifen entspricht. Daher sind sie statt mit den m-Werten mit f_{sch} und seinen Submultiplen $f_{\text{sch}}/5$ und $f_{\text{sch}}/50$ bezeichnet.) Bei der Schachbrettfrequenz ist, da die Seitenbänder zwischen den Hauptlinien sich oberhalb $\Delta f_z/f_z = 0{,}5$ überschneiden, schon für $\alpha = 45°$ keine Lücke mehr im Spektrum vorhanden.

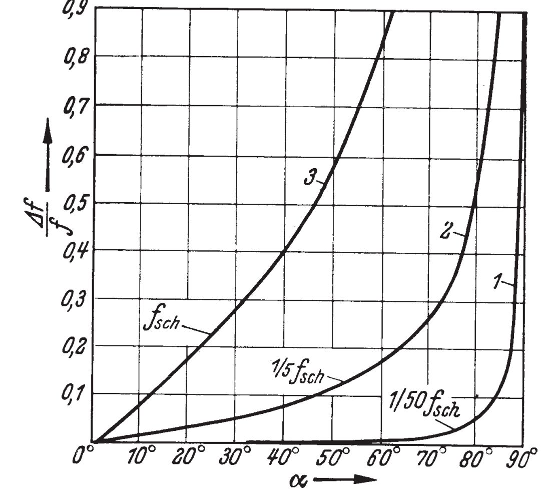


Abb. 214. Darstellung der Frequenzänderung $\Delta f/f$ als Funktion des Winkels α in Abb. 213c; für $a/b = 1$ und $k = 100$. Kurve *1*: $m = 1$; Kurve *2*: $m = 10$; Kurve *3*: $m = 50$. Die Schachbrettfrequenz ist mit f_{sch} bezeichnet. Nach V. [*10a*].

Man beachte, daß durch die Wahl des Neigungswinkels α die n-Bildfeldkomponente im Sinne von MERTZ und GRAY festgelegt ist. Mit $m = 50$, $k = 100\,b/a = 1$ und $\alpha = 45°$ resultiert nach Gl. (V.66) $\Delta f/f = 1/2$, also beginnende Überlappung im Spektrum. Da dies, wie wir in Kap. V.1c sahen, bei $n = k/2$ eintritt, wird $n = m$, wie es bei 45° Neigung der Streifen sein muß. Es sei nochmals darauf hingewiesen, daß nach KÖLLNER [*3*] bei der Zeilensprungabtastung eine Auffüllung der energetischen Lücken des Fernsehspektrums stattfindet. Die Übertragungsleistung verteilt sich im ganzen Frequenzbande des Kanals gleichmäßiger, und man kann mit dieser Tatsache vielleicht sogar den objektiv vergrößerten Informationsgehalt erklären, den bei gegebener Bandbreite das Zeilensprungbild im Vergleich zur klassischen Abtastmethode mit sich bringt. Beim Farbfernsehen

nach dem NTSC-System kann sich die durch Gl. (V.64, 65) ausgedrückte prozentuale Änderung von f dahingehend auswirken, daß schräge Streifen störend verfärbt erscheinen. Der zur Übertragung von Farbton und -sättigung (Chrominanz) dienende Hilfsträger ist eine hohe ungerade Harmonische der halben Zeilenfrequenz, $f_z/2$. Sein Seitenbandspektrum fällt daher im ungestörten Zustand mitten zwischen die Linien des mit ganzen Vielfachen von f_z modulierten Haupt-

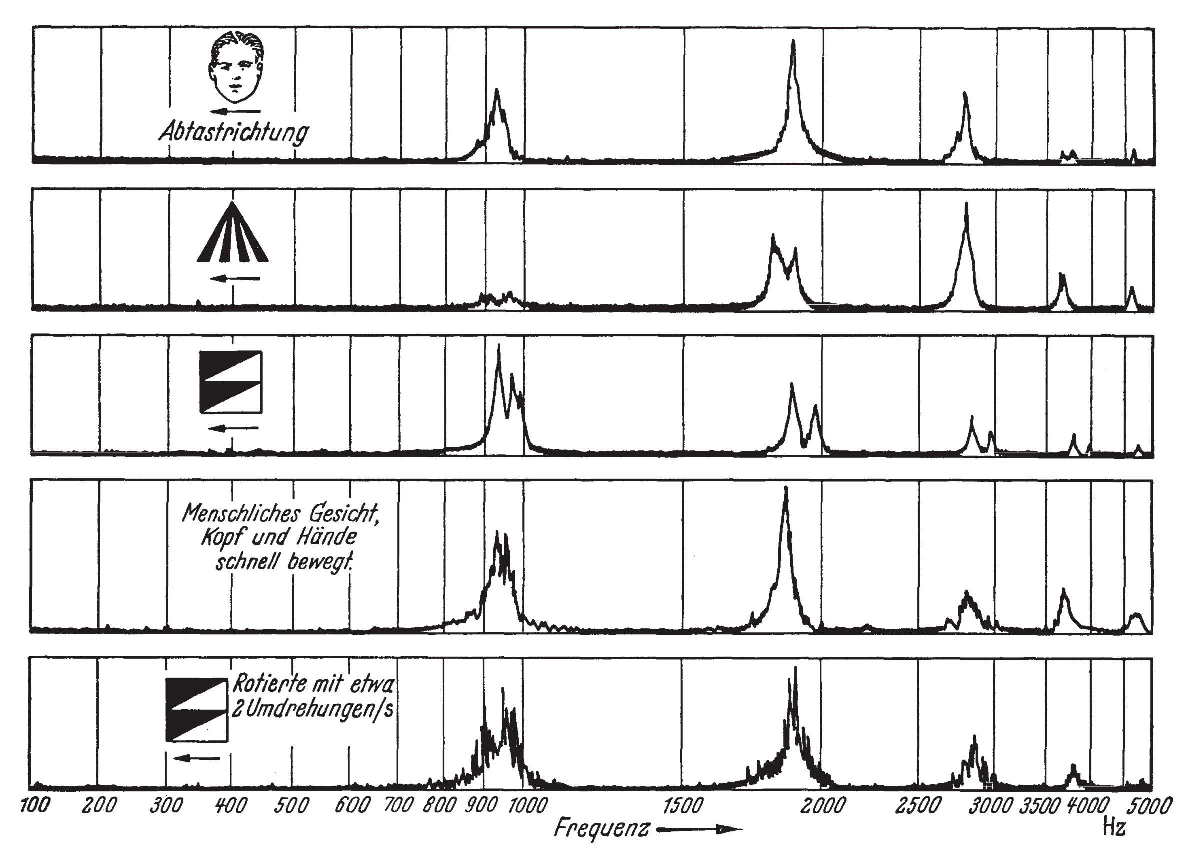


Abb. 215. Analysen des Frequenzspektrums, das bei der Fernsehabtastung verschiedener Vorlagen oder Objekte entsteht, nach P. MERTZ und F. GRAY, V. [2]. Zeilenfrequenz $f_z = 940$ Hz, Auflösung 50 Zeilen. Die beiden untersten Beispiele betreffen bewegte Gegenstände.

trägers, der nur die Helligkeit (Luminanz) übermittelt (frequency-interleaving). Die Hilfsträgerfrequenz selber ist vom Bildinhalt unabhängig und fest. Es werde nun ein schräger bunter Streifen abgetastet, der einen Sprung des Luminanzwertes repräsentiert. Gemäß der WINCKELschen Beziehung ändert sich dann f_z und damit zugleich die Frequenzlage aller auftretenden Harmonischen von f_z relativ zum Haupt- und zum Hilfsträger. Betrüge diese Änderung der Zeilen-Grundfrequenz f_z beispielsweise 1%, so würde bei deren 50. Harmonischer die Verschiebung bereits den Betrag $f_z/2$ ausmachen. Infolgedessen würde im Modulationsspektrum des Hauptträgers eine Reihe von Linien mit dem Spektrum des Hilfsträgers praktisch zusammenfallen: Luminanz- und Chrominanzkanal interferieren miteinander. Farbige Streifen (jedoch nicht schwarze, graue oder weiße, weil bei diesen der Hilfsträger unterdrückt ist), würden verfärbt wiedergegeben werden, da der Modulationsgrad des Hilfsträgers geändert erscheint.

Ungeachtet dessen beweist die Praxis, daß bei kontinuierlichen Bewegungen, während deren die Neigung gewisser Linien sich im Bildfeld *stetig* ändert, das Frequenzspektrum als Ganzes seinen in f_z periodischen und lückenhaften Charakter beibehält. Abb. 215 zeigt einige von MERTZ und GRAY bei fernsehmäßiger Übertragung sehr unterschiedlicher Vorlagen gemessene Spektralverteilungen. Die beiden untersten Beispiele beziehen sich, wie im Bilde angegeben, auf ein

während der Abtastung bewegtes bzw. rotierendes Objekt. Letzteres muß also das von WINCKEL betrachtete Intervall der Schräglagen im Bildfeld durchlaufen haben. Außer der im Sinne von WINCKELS Ausführungen liegenden feineren Gliederung der Seitenbänder ist eine wesentliche Differenz gegenüber der periodischen Struktur, die von den übrigen Vorlagen erzeugt wurde, nicht vorhanden.

4b. Beziehungen zur Optik.

Die Verwandtschaft zwischen den optisch-elektrischen und den rein optischen Übertragungen ist uns im Voraufgehenden beim Betrachten der Wechselwirkung zwischen Bild und Signal wiederholt begegnet. Der Vergrößerung des Beugungsscheibchens eines Lichtpunktes bei Hintereinanderschaltung mehrerer abbildender Systeme entspricht die zunehmende Unschärfe durch zweimaligen Blendeneinfluß bei Abtastung und Wiedergabe des übertragenen Bildes mittels kreisrunder Öffnungen (abgesehen vom Hinzukommen weiterer Aperturcharakteristiken — Kamera-Objektiv, Auge). Die frequenzabhängige Amplitudendämpfung der endlich weiten Blende, ihr Übertragungsmaß, ist mit der eines *Tiefpasses* vergleichbar; der optische Integrationseffekt des Blendenquerschnitts läßt sich elektrisch nach Kap. IV. 8b im Prinzip entzerren, z. B. durch eine kompensierende Verstärker-Durchlässigkeit.

Auch für die Entstehung der Fremdkomponenten läßt sich ein optisches Analogon finden. Wie R. THEILE [*11*] gezeigt hat, sind Störmuster nach Art der von MERTZ und GRAY beschriebenen durch *Interferenz* geeigneter Bildvorlagen mit einem Strichraster auf direktem lichtoptischen Wege herstellbar. THEILE übertrug eine Sternfigur nach Abb. 216a durch ein Fernsehgerät auf den Schirm einer BRAUNschen Bildschreibröhre unter Veränderung der Zeilenzahl. Die erzielten Wiedergaben sind aus Abb. 216b, c, d, e, f ersichtlich; b entspricht der höchsten, f der niedrigsten Zeilenzahl, bei der die Weite des Schreiblichtpunktes vergrößert wurde, um die Lücken des Zeilenrasters besser zu schließen. Man sieht deutlich das immer stärkere Hervortreten einer im Original nicht vorhandenen Interferenzfigur. Daß es sich um eine solche handelt, bewies der unmittelbare lichtoptische Effekt beim Photographieren der Vorlage a durch ein Strichraster hindurch (Abb. 216g). Beim Vergleich des Ergebnisses mit dem der elektrischen Übertragung durch Zeilenabtastung wird es klar, daß beide Phänomene auf dieselbe physikalische Ursache zurückzuführen sind, nämlich die Interferenz der hintereinandergeschalteten periodischen Strukturen des Zeilenrasters und des Prüfsternes nach Abb. 216a.

4c. Abtastung beim Farbenfernsehen.

Beim Farbfernsehen gelten die in den Kap. III bis V behandelten Blenden-Zeitkonstanten- und Frequenzbandeinflüsse sowie die Erkenntnisse der zweidimensionalen Theorie in bezug auf Frequenzspektrum, Mehrdeutigkeiten und Störkomponenten grundsätzlich unverändert für jeden der drei in der Kamera getrennt zerlegten optischen Farbauszüge. Die Verzerrungswirkungen der Abtastung und Wiedergabe addieren sich aus allen drei Kanälen in dem resultierenden farbigen Fernbild. Das mindere Auflösungsvermögen des Auges für die rote und besonders für die blaue Komponente läßt größere Unschärfe zu und würde daher die Benutzung weiterer Blendenquerschnitte und stärkerer Bildpunkt-Lichtströme erlauben; da aber beim Grünauszug bzw. im Luminanzkanal die dem optimalen Schwarz-Weiß-Bild äquivalente Steilheit des Helligkeitsüber-

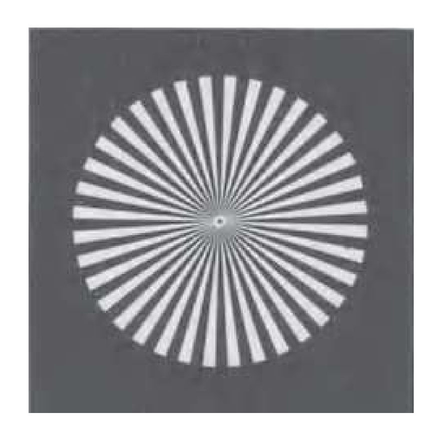


Abb. 216 a.



Abb. 216 b.

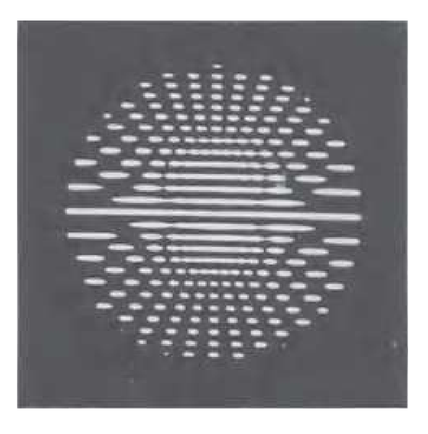


Abb. 216 c.

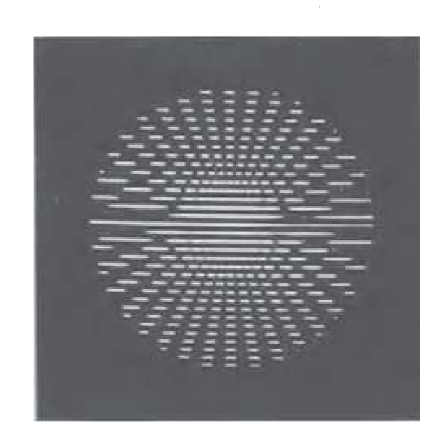


Abb. 216 d.

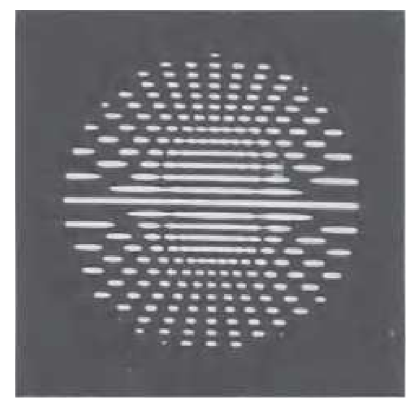


Abb. 216 e.

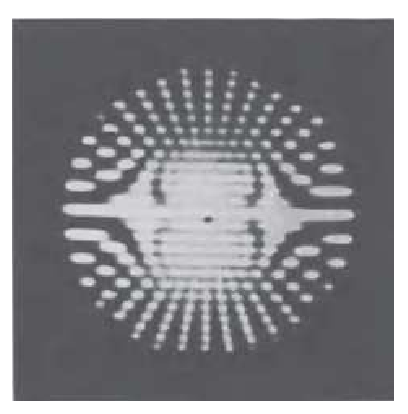


Abb. 216 f.

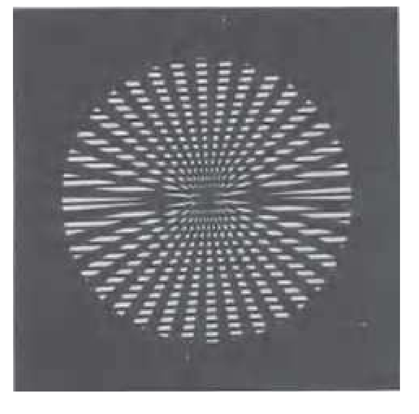


Abb. 216 g.

Abb. 216 a–g. Interferenzbilder von Zeilenrastern und Prüfstern (a) bei verschiedener Zeilenzahl nach R. THEILE, V. [*11*]. Die Bilder b bis f sind fernsehmäßige Übertragungen; g ist durch direkte Photographie entstanden und zeigt genau die gleiche Erscheinung.

ganges erreicht und somit in ihm das volle, durch die genormte Breite bestimmte Frequenzband übertragen werden muß, geht man in der Praxis so vor, daß auch das rote und das blaue Farbbild mit kleinem Elektronen-Brennfleck abgetastet und die von der Feinstruktur dieser Auszüge erzeugten höheren Frequenzen nach Abfilterung derselben dem Grünsignal im Luminanzkanal hinzugemischt werden.

Bei einem älteren, von der RCA entwickelten System werden die drei Farbkomponenten mit Hilfe eines Abfrageverfahrens (sampling) zum Empfänger übermittelt. Von den Ausgangssignalen der drei in der Farbkamera simultan arbeitenden Bildabtaströhren werden alle Frequenzen zwischen 2 MHz und 4 MHz, wie vorstehend beschrieben, als additives Summensignal durch einen nur die Feinstruktur der *Helligkeits*änderungen übertragenden Kanal gesendet. Für die Farbinformation genügt das Band unterhalb 2 MHz. Hinter den drei entsprechenden, 0 MHz bis 2 MHz durchlassenden Tiefpässen werden aus dem kontinuierlichen Spannungsverlauf der Rot-, Grün- und Blauabtastung periodisch Amplitudenproben (samples) entnommen. Dies muß für jede Farbe mit solcher Frequenz geschehen, daß auf die Periode von 2 MHz mindestens zwei kurze Abtastimpulse entfallen. Betrachtet man die Sinuswelle der Grundfrequenz *einer* solchen Impulsfolge, so zeigt sich, daß ihre Amplitude bei 120° und 240° durch Null geht. In diese Zeitpunkte kann man daher die zwei anderen Impulsfolgen gleicher Frequenz ohne gegenseitige Beeinflussung hineinlegen. Man erhält sie mit Hilfe eines elektronischen Kommutators, der die Ausgänge der drei erwähnten Tiefpässe zyklisch wechselnd mit je 120° Phasenunterschied abtastet, als drei ineinander geschachtelte Folgen von amplitudenmodulierten Stromstößen, deren momentane Stärke dem Gehalt des abgetasteten Bildpunktes an der zugeordneten Farbkomponente proportional und von den beiden anderen Komponenten unabhängig ist. Es kann also keine Verfälschung des Farbtones eintreten. Die *Grundschwingungen* der drei Impulsfolgen werden einander superponiert und ergeben als Übertragungssignal eine amplitudenmodulierte 2-MHz-Sinuswelle. Mit Hilfe eines synchronen Empfangsdetektors, der den resultierenden Farbträger in den Zeitpunkten abtastet, die denen der Abfrageimpulse beim Geber entsprechen, werden die Steuerimpulse für die Farbwiedergaberöhre entnommen.

Ein solches Abfrageverfahren ermöglicht also, aus dem zeitlichen Verlauf der Einhüllenden des resultierenden Farbträgers pro Periode drei verschiedene Nachrichtenwerte zu entnehmen. Es ist insoweit frequenzbandsparend und gehört daher zu den im 2. Teilband näher behandelten Möglichkeiten.

Schrifttum zum Kap. V.

[*1*] Urtel, R.: Die Gleichstromkomponente des Fernsehsignals. SEG-Nachr. Bd. 1 (1953) S. 47–53.

[*2*] Mertz, P., u. F. Gray: Theory of Scanning. Bell Syst. techn. J. Bd. XIII (1934) S. 464–515.

[*2a*] Mertz, P.: Television — The Scanning Process. Proc. Inst. Radio Engrs., N. Y. Bd. 29 (1941) S. 529–537.

[*3*] Köllner, H.: Über die Zerlegung und den Aufbau eines Fernsehbildes. Telefunkenztg. Bd. 19, Nr. 78 (1938) S. 46–60.

[*4*] Urtel, R.: Vortrag vor der Deutschen Gesellschaft für Technische Physik. 20. 11. 1936, vgl. bei [*4a.*].

[*4a*] Schröter, F.: Fernsehen. S. 45, Abb. 35. Berlin: Springer 1937.

[*5*] Schröter, F.: Handbuch der Bildtelegraphie und des Fernsehens. Abb. 73 u. 74, S. 108/109. Berlin: Springer 1932.

[*6*] Britische Patente Nr. 332284 und 350455 (1929).

[*7*] Dome, R. B.: High Definition Television. New Bandwidth Compression System. Wireless Wld. Bd. 57 (1951) S. 156.

[*8*] Bell, D. A.: Economy of Bandwidth in Television. J. Brit. Inst. Radio Engrs. Bd. 13 (1953) S. 447–470.

[*9*] Delvaux, J. L.: Bases théoriques du choix de normes en télévision. Onde électr. Nr. 226 (Mai 1949); ferner

Mallein, S.: Note sur un nouveau procédé tendant à diminuer les interférences entre émetteurs de télévision travaillant sur le même canal. Sonderdruck SM/277 der Radiodiffusion Télévision-Française.

Delbord, Y.: La télévision et la transmission des informations. Ann. Télécomm. Bd. 6 (1951) S. 11.

[*10*] Winckel, F.: Das Energiespektrum des Fernsehbildes. A. E. Ü. Bd. 6 (1952) S. 385–387.

[*10a*] Nachtrag zu [*10*]; persönliche Mitteilung des Verfassers, Veröffentlichung geplant.

[*11*] Theile, R.: Ein Beispiel zu dem Auftreten von Störstrukturen in Fernsehbildern. F.T.M, Heft 17 (1940) S. 257–259.